



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - UFPB
CENTRO DE TECNOLOGIA - CT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL - DECA
CURSO ENGENHARIA AMBIENTAL

JOÃO VITOR DIAS DA SILVA LIMA

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA INCORPORAR A TRAJETÓRIA DE
TORMENTAS NA MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O HIDROPIXEL**

JOÃO PESSOA – PB
2026

JOÃO VITOR DIAS DA SILVA LIMA

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA INCORPORAR A TRAJETÓRIA DE
TORMENTAS NA MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O HIDROPIXEL**

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Ambiental, do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz.

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

L732f Lima, João Vitor Dias da Silva.

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA INCORPORAR A
TRAJETÓRIA DE TORMENTAS NA MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O
HIDROPIXEL / João Vitor Dias da Silva Lima. - João
Pessoa, 2026.
72 f.

Orientação: Adriano Rolim da Paz.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Modelagem hidrológica. 2. Hidropixel-DLR. 3.
Trajetórias de tormenta. 4. Gerador de chuva sintética.
I. Paz, Adriano Rolim da. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 628(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

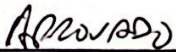
JOÃO VITOR DIAS DA SILVA LIMA

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA INCORPORAR A TRAJETÓRIA DE TORMENTAS NA MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O HIDROPIXEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em sessão de defesa pública realizada em
12/02/2026, perante a seguinte comissão julgadora:



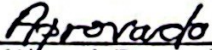
Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz
Orientador
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/CT/UFPB



(Aprovado/Reprovado)



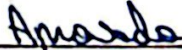
Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida
Membro Interno
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/CT/UFPB



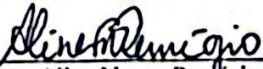
(Aprovado/Reprovado)



Prof. Dr. Germano Gondim Ribeiro Neto
Membro Interno
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental



(Aprovado/Reprovado)



Profa. Dra. Aline Nunes Renfúgio Antunes
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

JOÃO PESSOA - PB
2026

AGRADECIMENTOS

Movido por uma imensidão de emoções, escrevo esta mensagem à noite, pois é quando todas as canções dos amantes são feitas. E minha alma também é como o canto de um amante, como dissera Nietzsche em *Assim falou Zaratustra*, página 106.

Por ter concluído esta trajetória de graduação, gostaria de agradecer àqueles que a tornaram única. Primeiramente, agradeço à natureza, ao universo, ao tudo e ao nada... a Deus.

Em seguida, agradeço à minha primeira família. À senhora minha mãe, Lucicleide Laura, por ter me proporcionado as melhores condições para que eu pudesse seguir meus sonhos. À senhora minha avó, Damiana Laura (*in memoriam*), por todos os ensinamentos que se tornaram a base das minhas virtudes. Ao senhor meu avô, Severino Antônio (*in memoriam*), por ter me ensinado os princípios do respeito. À minha querida irmã, Nayla Heloisy, por todo o companheirismo.

À senhorita minha noiva, Maria Laura, agradeço por me ensinar sobre a paciência e o amor. Desde que a encontrei, minha vida tornou-se mais bela. Agradeço à senhora minha sogra, Ednalva Menezes, por todos os conselhos e pelo acolhimento. Ao senhor meu sogro, Rinaldo Gonçalves, por me ensinar a não desistir. E à minha outra irmã, Maria Júlia.

Parágrafo especial dedico ao professor Jailton Francisco, a quem tenho muito apreço, por ter visto em mim uma luz que eu ainda não enxergava. O ser que me tornei hoje carrega as lições sobre a vida que me foram por ele ensinadas. Obrigado.

No âmbito acadêmico, agradeço ao professor Cristiano Almeida por me apresentar a hidrologia de forma cativante, mostrando que seria possível aplicar a programação nos projetos do curso, sendo este o estopim que me trouxe até aqui. E por aceitar fazer parte da banca examinadora deste estudo.

Em seguida, agradeço ao professor Adriano Rolim por todo o companheirismo, ensinamentos e confiança. O entusiasmo e a paixão que possui pelo ensino foram fundamentais para impulsionar meu crescimento acadêmico e pessoal ao longo dos últimos dois anos.

Agradeço também ao professor Germano Neto por ter aceitado participar da banca examinadora desse trabalho.

Agradeço à Maria Eduarda por ter compartilhado comigo parte dessa trajetória acadêmica. Sua presença e incentivo foram importantíssimos para me motivar a estudar e seguir evoluindo durante o curso.

De forma geral, agradeço a todos os demais amigos que, de alguma maneira, contribuíram durante minha graduação. Em especial, Victor Nascimento, Tayane Siqueira, Lucas Gomes, João Carlos, Luciana Valéria, Júlia, Manoella Moraes, Antônio Marcos, Antônio Edmilson, Felipe Pachêco, João Henrique, João Victor, Júlia Araújo, Acauã Bernardo, Natália Mendes bem como todos aqueles que, mesmo não citados nominalmente, fizeram parte desse percurso.

Por fim, agradeço aos amigos Gabriel Rafá, Gustavo Almeida e Rodrigo Marinho por todas as experiências e aventuras vividas nos últimos anos, cuja amizade tornou essa caminhada mais leve e significativa.

Science is elegant.

RESUMO

As inundações figuram entre os desastres ambientais mais recorrentes no Brasil, com impactos humanos e econômicos expressivos, cuja severidade depende não apenas do total precipitado, mas também da forma como a chuva se organiza e se desloca sobre a bacia hidrográfica. Como a precipitação raramente atua de modo estacionário, especialmente em bacias de maior dimensão, a avaliação de diferentes trajetórias de tormentas torna-se útil para compreender cenários críticos de formação de cheias, uma vez que direção, sentido e velocidade do deslocamento podem sincronizar ou dessincronizar a geração e a propagação do escoamento, alterando vazão de pico, tempo de pico e a forma do hidrograma. Nesse contexto, este trabalho desenvolveu uma ferramenta computacional, integrada ao QGIS, para gerar campos espaço-temporais de precipitação móveis e incorporá-los à modelagem hidrológica com o Hidropixel-DLR. O sistema combina uma interface gráfica em *Python* com rotinas em Fortran 90 visando à redução do custo computacional, permitindo controlar o deslocamento da tormenta por trajetória definida, velocidade e raio de influência, além de considerar alternativas de precipitação espacialmente constante ou distribuída. A ferramenta foi aplicada à bacia do alto curso do rio Tapacurá (PE), delimitada até o posto fluviométrico de Vitória de Santo Antão (39170000), com área aproximada de 262 km², avaliando trajetórias montante–jusante (TMJ) e jusante–montante (TJM) e diferentes áreas de influência. Os resultados indicaram influência da trajetória de tormenta sobre a resposta hidrológica. Para a precipitação espacialmente constante, TMJ produziu vazão de pico de 933,0 m³/s em 21,0 h, enquanto TJM resultou em 263,87 m³/s em 28,75 h, ocasionando aumento do pico de 3,5 vezes e antecipação do tempo de pico no sentido montante–jusante. Ao considerar chuva espaço-temporalmente variável, os picos foram 307,04 m³/s (19,75 h) em TMJ e 156,43 m³/s (20,0 h) em TJM, preservando o viés direcional e modificando a estrutura do hidrograma. Além disso, o aumento do raio da tormenta de 4 km para 8 km elevou significativamente as vazões de pico (307,04 para 954,42 m³/s em TMJ – 3 vezes maior; 156,43 para 640,27 m³/s em TJM), atenuando o viés direcional. Portanto, a ferramenta proposta amplia a capacidade de representação física do processo chuva–vazão, oferecendo suporte a estudos hidrológicos voltados à análise de eventos extremos e à gestão de risco de inundações.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. Hidropixel-DLR. Trajetórias de tormenta. Gerador de chuva sintética.

ABSTRACT

Floods rank among the most recurrent environmental disasters in Brazil, producing substantial human and economic impacts. Their severity depends not only on total rainfall depth but also on the spatial organization and movement of precipitation over the watershed. Because rainfall systems rarely behave in a stationary manner – particularly in medium- to large-sized basins – the assessment of distinct storm trajectories becomes essential for understanding critical flood-generation scenarios. Storm direction, orientation, and translation velocity may synchronize or desynchronize runoff generation and propagation processes, thereby modifying peak discharge, time to peak, and overall hydrograph shape. Within this context, this study developed a computational tool integrated into QGIS to generate moving spatiotemporal precipitation fields and incorporate them into hydrological modeling using the Hidropixel–Distributed Linear Reservoirs (Hidropixel-DLR) framework. The system combines a Python-based graphical user interface with computational routines implemented in Fortran 90 to reduce computational cost. It enables explicit control of storm translation through predefined trajectories, velocity, and radius of influence, while also allowing the simulation of spatially uniform or spatially distributed rainfall patterns. The tool was applied to the upper Tapacurá River basin (Pernambuco State, Brazil), delineated up to the Vitória de Santo Antão stream gauge (39170000), encompassing an area of approximately 262 km². Upstream–downstream (TMJ) and downstream–upstream (TJM) storm trajectories were evaluated under different storm influence areas. The results demonstrated a clear influence of storm trajectory on hydrological response. Under spatially uniform rainfall conditions, the TMJ trajectory produced a peak discharge of 933.0 m³/s at 21.0 h, whereas the TJM trajectory resulted in 263.87 m³/s at 28.75 h, representing a 3.5-fold increase in peak flow and an earlier time to peak in the upstream–downstream direction. When spatially and temporally variable rainfall was considered, peak discharges reached 307.04 m³/s (19.75 h) for TMJ and 156.43 m³/s (20.0 h) for TJM, preserving the directional bias while modifying hydrograph structure. Furthermore, increasing the storm radius from 4 km to 8 km substantially amplified peak discharges (from 307.04 to 954.42 m³/s in TMJ – approximately threefold – and from 156.43 to 640.27 m³/s in TJM), partially attenuating the directional bias. Overall, the proposed tool enhances the physical representation of the rainfall–runoff process, providing support for hydrological studies focused on extreme events and flood risk management.

Keywords: Hydrological modeling. Hidropixel-DLR. Storm movement. Synthetic storm generator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas da inundação no leito maior do curso d'água: a) fluxo seguindo a calha principal do rio; b) início do escoamento na planície de inundação, direção variável do fluxo; c) Inundação ocorrendo sobre toda a planície e interagindo com a calha do rio ao longo de toda sua extensão; d) fim da cheia com armazenamento de água nas várzeas.....	19
Figura 2 - Categorização dos registros de desastres ambientais relacionados com chuvas intensas no Brasil.....	21
Figura 3 - Exemplos de inundações observadas no município de Vitória do Santo Antão (PE) em diferentes dias de 2022. a) 28/05/22; b) 03/06/22; c) trecho do rio Tapacurá que cruza o centro do município; e d) inundações do rio Tapacurá em 28/05/22.	22
Figura 4 - Representação esquemática da determinação do hidrograma no modelo Hidropixel-DLR. a) efeito de translação do hidrograma de um pixel qualquer. b) exemplificação do efeito de armazenamento de acordo com o tempo de viagem do escoamento do pixel. Na ilustração, a região em verde é a discretização da bacia hidrográfica, as linhas em azul é a rede de drenagem e as setas em azul o caminho de fluxo do pixel até o exutório.....	24
Figura 5 - Interface gráfica da tela principal do complemento Rain Generator do QGIS, desenvolvido por Ghomash (2024).	28
Figura 6 - Esquema do gerador dinâmico de tormentas apresentado em Gao et al. (2019). ...	29
Figura 7 - Hidrogramas para os seis eventos estabelecidos por Ghomash (2024) para diferentes variações temporais da precipitação seguindo a direção oeste-leste (montante-jusante).....	30
Figura 8 - Fluxograma metodológico da pesquisa.....	33
Figura 9 - Esquematização do processo de definição dos campos espaço-temporais de precipitação do Gerador de Tormentas. a) etapa inicial, usuário define os pontos para estabelecer direção e sentido do percurso; b) definição da região de interesse e da precipitação.	35
Figura 10 - Esquema ilustrativo com equações utilizadas para propagação dos campos espaço-temporais de precipitação do Gerador de Tormentas.	37
Figura 11 - Representação da definição da Bounding Box para otimização da definição da região de interesse do campo de precipitação. Na ilustração, são apresentadas as equações que estabelecem as linhas e colunas iniciais e finais da busca, onde “raio_pix” representa o raio enviado pelo usuário dividido pela resolução espacial da imagem raster. No caso da ilustração, dx.	38
Figura 12 - Representação da variabilidade temporal (a) e espacial (b) a partir da aplicação das Equações 1 e 2. c) ilustra uma célula de precipitação em 3D.	40
Figura 13 - Ilustração dos campos espaço-temporais com precipitação espacialmente uniforme. No esquema, o hietograma representa os dados enviados para o Gerador de Tormentas que retorna a reorganização da precipitação de acordo com a velocidade e direção fornecida.	41

Figura 14 - Ambiente gráfico do software Qt Designer. Na imagem, o retângulo com número 1 mostra o conjunto de elementos (chamados de widget no programa) que podem ser utilizados para executar ações na interface gráfica. O retângulo 2 delimita a aba de propriedade dos widget do número 1. Por fim, o retângulo 3 ilustra a interface gráfica do Gerador de Tormentas em fase de desenvolvimento.	42
Figura 15 - Esquema ilustrativo da conexão entre o executável Fortran e o QGIS (interface gráfica criada em Python).....	44
Figura 16 - Fluxograma de processos das funções de checagem após clique no botão “Executar” do complemento proposto.	46
Figura 17 - Mapa de localização da área de estudo, com destaque para a hipsometria e drenagem da bacia hidrográfica. As Estações Pluviométricas (EP) representam: EP1 - 261130901A; EP2 – 261640702A; EP3 – 39170000.	49
Figura 18 - Mapa de uso e cobertura do solo com porcentagem de área ocupada por cada classe.	50
Figura 19 - a) hietograma do evento ocorrido entre 22 e 23 de junho de 2022; e b) precipitação acumulada do evento.	52
Figura 20 - Mancha de inundação observada no município de Vitória do Santo Antão no dia 23/06/2022, imagem obtida a partir do satélite PlanetScope.....	53
Figura 21 - Hidrogramas observados e calculados através do Hidropixel para o evento de junho/2022 na bacia hidrográfica do rio Tapacurá.....	56
Figura 22 - Trajetórias de tormenta escolhidas para geração dos campos espaço-temporais de precipitação a partir do Gerador de Tormentas.	57
Figura 23 - Interface gráfica do Gerador de Tormentas integrado ao QGIS como um complemento. a) interface em português; b) interface em língua inglesa.	59
Figura 24 - Mapa do tempo de viagem do escoamento superficial (a) até o exutório e histograma Tempo-Área (b).	60
Figura 25 – Mapas da precipitação acumulada e precipitação excedente acumulada durante a duração do evento para direção seguindo a rio Tapacurá. a) precipitação acumulada do cenário uniforme; b) precipitação acumulada para o caso distribuído; c) precipitação excedente acumulada do cenário uniforme; d) precipitação excedente acumulada para o caso distribuído.	61
Figura 26 - Hietograma de precipitação versus hietograma de chuva efetiva para pixels em diferentes zonas da bacia hidrográfica. Ponto 1, na cabeceira; ponto 2, no centro; ponto 3, no exutório.....	62
Figura 27 - Mapa de precipitação acumulada e precipitação efetiva acumulada para os raios de tormenta de 4 e 8 km. a) distribuição da precipitação acumulada para a tormenta de 4 km; b) precipitação acumulada para o raio de tormenta de 8 km; c) precipitação excedente acumulada para a tormenta com raio de 4 km; d) precipitação excedente acumulada para a tormenta com raio de 8 km.	63

Figura 28 - Hidrogramas para as trajetórias TMJ e TJM das simulações com chuva uniforme e variável no tempo e no espaço..... 64

Figura 29 - Hidrogramas para as trajetórias TMJ e TJM das simulações com raios de 4 e 8 quilômetros..... 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ferramentas do software Qt Designer aplicadas no desenvolvimento do Gerador de Tormentas e a função exercida na aplicação.	43
Tabela 2 - Checagens de coerência dos dados de entrada.	45
Tabela 3 - Área dos municípios contidos na delimitação da bacia hidrográfica objeto de estudo.	47
Tabela 4 - Coeficientes de Manning e k utilizados para estimativa do tempo de viagem do escoamento.	50
Tabela 5 - Valores do Curve Number (CN) para as classes de uso e cobertura do solo dos diferentes grupos hidrológicos.....	54
Tabela 6 - Valores do parâmetro curve number após calibração do modelo Hidropixel-DLR.	55
Tabela 7 - Parâmetros utilizados no Gerador de Tormentas para criação de chuvas sintéticas.	58
Tabela 8 - Dados quantitativos dos hidrogramas para as trajetórias TMJ e TJM das simulações uniformes e espaço-temporalmente variáveis.....	65
Tabela 9 - Dados quantitativos dos hidrogramas para as trajetórias TMJ e TJM considerando os raios de 4 e 8 quilômetros.....	67

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
2.	OBJETIVOS.....	18
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
3.1	Inundações.....	19
3.1.1	Conceito, fatores influentes e impactos.....	19
3.1.2	Eventos extremos de cheia recentes no Brasil.....	20
3.1.3	Modelagem hidrológica de cheias.....	23
3.2	Efeito da trajetória de tormentas.....	26
3.2.1	Relevância para formação de cheias.....	26
3.2.2	Ferramentas computacionais para criação de trajetórias de tormentas.....	27
3.2.3	Estudos de simulação da trajetória de tormentas.....	30
4.	METODOLOGIA.....	33
4.1	Visão geral.....	33
4.1.1	Algoritmo de geração de campos espaço-temporais de precipitação.....	34
4.1.2	Interface gráfica e integração ao QGIS.....	41
4.1.3	Funcionalidade de checagem de dados de entrada.....	45
4.2	Área de estudo e dados disponíveis.....	47
4.2.1	Localização.....	47
4.2.2	Caracterização física para a modelagem hidrológica.....	47
4.2.3	Dados hidrológicos.....	51
4.3	Simulação Hidrológica com o Hidropixel.....	53
4.3.1	Calibração do modelo Hidropixel-DLR.....	53
4.3.2	Cenários simulados.....	56
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
5.1	Interface gráfica como um complemento no QGIS.....	59
5.2	Tempo de viagem do escoamento.....	60
5.3	Geração de escoamento superficial.....	60
5.4	Hidrogramas resultantes.....	63
5.4.1	Precipitação uniforme <i>versus</i> variável.....	63
5.4.2	Variação do raio da tormenta.....	66
6.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	68
6.1	Conclusões.....	68

6.2	Recomendações	69
7.	REFERÊNCIAS	70

1. INTRODUÇÃO

As inundações representam um dos desastres ambientais mais recorrentes, afetando diversas regiões do mundo com perdas humanas, econômicas e ambientais expressivas, como a ocorrida no Rio Grande do Sul em 2024 (Collischonn *et al.*, 2024; Marengo *et al.*, 2024). A intensificação desses eventos é frequentemente associada às mudanças climáticas, que elevam a frequência e a intensidade das precipitações extremas. Contudo, é necessário considerar também a relação com a expansão urbana e as modificações no uso do solo e como alteram o ciclo hidrológico, devido ao aumento da impermeabilização, que agrava a vulnerabilidade das cidades, tornando a gestão de riscos e desastres um desafio para os gestores (Dias *et al.*, 2023; Queiroga *et al.*, 2024; Souza *et al.*, 2024). Com isso, a análise aprofundada dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas torna-se essencial para o planejamento e a implementação de medidas de mitigação e adaptação das cidades frente às adversidades climáticas (Marengo *et al.*, 2024; Souza *et al.*, 2024).

A modelagem hidrológica é uma ferramenta fundamental para a realização de estudos de apoio à tomada de decisão em questões relativas à gestão dos recursos hídricos (Fan *et al.*, 2013). Um modelo hidrológico (MH) corresponde a uma representação matemática dos processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica. Nesse sentido, a precisão das simulações depende intrinsecamente da representação dos processos físicos, em especial das características espaço-temporais da precipitação. Isso ocorre principalmente em áreas urbanas, onde pequenas variações na configuração da chuva alteram a dinâmica do escoamento (Cristiano *et al.*, 2017). Com isso, a transformação da chuva em vazão é condicionada pela dinâmica da tormenta, cujas variáveis de intensidade, duração, direção e velocidade determinam a forma e a magnitude do escoamento superficial (Gao *et al.*, 2019; Ghimire *et al.*, 2021). A estrutura de um hietograma e o movimento da célula de chuva sobre a bacia influenciam diretamente o tempo de pico e a vazão máxima observada no exutório (Gao *et al.*, 2019; Ghomash, 2024).

A trajetória da precipitação, ou tormenta, carrega informações sobre sua direção e velocidade. Uma tormenta com mesma intensidade, mas com direções e velocidades variáveis pode ocasionar resultados diferentes. Esse efeito é conhecido por viés direcional (*directional bias*), avaliado principalmente quando a chuva se alinha a trajetória do canal principal da bacia hidrográfica. Com isso, quando as tormentas se movem no sentido do fluxo (montante para jusante) tendem a gerar picos de vazão significativamente superiores àquelas que se deslocam em sentido oposto, demonstrando a complexidade dos processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica (Singh, 1997). Outrossim, avaliar esses cenários demandam ferramentas

computacionais de criação de chuvas sintéticas, pois nem todas as regiões dispõem dados de radar que assimilam essas características da chuva (Gao *et al.*, 2019; Ghomash, 2024). As precipitações geradas por esses métodos podem carregar informações de eventos reais de acordo com os sistemas precipitantes da região, como também podem ser concebidas para cenários diversos.

Com isso, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, integrada ao ambiente do Sistema de Informação Geográfica (SIG) QGIS e processada via linguagem Fortran 90, que possibilita a concepção e incorporação da trajetória de tormentas na modelagem hidrológica. A ferramenta permite ao usuário a definição de parâmetros como raio da tormenta, velocidade de deslocamento e trajetórias, oferecendo maior flexibilidade na criação de campos espaço-temporais de precipitação. Para a validação do sistema, foram gerados cenários de chuva sintética inseridos no modelo hidrológico Hidropixel-DLR. A área de estudo foi a bacia hidrográfica do alto curso do rio Tapacurá (PE), delimitada até o posto fluviométrico de Vitória de Santo Antão (39170000), região marcada pela recorrência histórica de eventos de inundação.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral:

Desenvolver uma ferramenta computacional de concepção e integração da trajetória espaço-temporal de tormentas na modelagem hidrológica com o modelo Hidropixel.

2.2 Objetivos específicos:

1. Analisar a integração da ferramenta de geração de tormentas ao SIG QGIS;
2. Avaliar a potencialidade da ferramenta desenvolvida na concepção de trajetórias de tormentas;
3. Avaliar o efeito de diferentes características de trajetórias de tormentas sobre a formação de cheias na área de estudo;

3. REFERENCIAL TEÓRICO

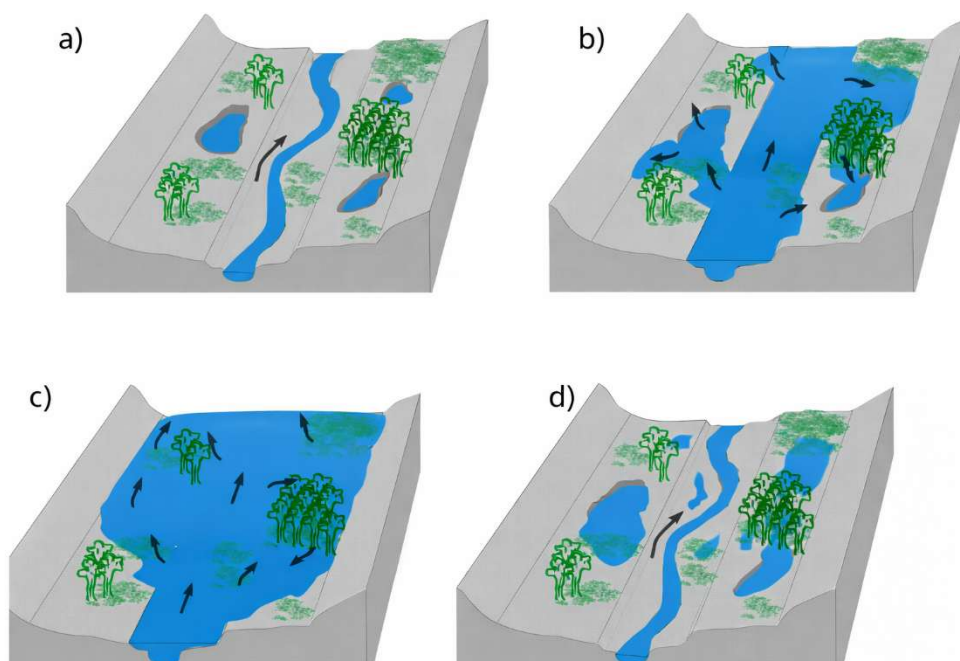
3.1 Inundações

3.1.1 Conceito, fatores influentes e impactos

As inundações fluviais são fenômenos resultantes de uma complexa interação entre fatores hidrogeomorfológicos e ocorrem quando a vazão ultrapassa a capacidade de descarga da calha principal do curso d'água, ocupando seu leito maior (planície de inundação). Como parte da dinâmica fluvial, são frequentemente observadas nos períodos de cheia. Além disso, são influenciadas pelo clima local, forma da bacia hidrográfica, tipo, uso e ocupação do solo, topografia etc. (Tucci, 2007; Guan *et al.*, 2023).

Quando o escoamento se dá na planície de inundação, as direções de fluxo são variáveis, ocupando uma área maior (Figura 1). Nas bacias hidrográficas predominantemente rurais e pouco antropizadas, as áreas ribeirinhas são ocupadas por vegetação, assim, o escoamento superficial é lento, favorecendo a infiltração e evapotranspiração. Nesse caso, o hidrograma final é amortecido, com vazão de pico defasada no tempo (Tucci, 2007; Paz *et al.*, 2009).

Figura 1 - Etapas da inundação no leito maior do curso d'água: a) fluxo seguindo a calha principal do rio; b) início do escoamento na planície de inundação, direção variável do fluxo; c) Inundação ocorrendo sobre toda a planície e interagindo com a calha do rio ao longo de toda sua extensão; d) fim da cheia com armazenamento de água nas várzeas.



Fonte: adaptado de Paz *et al.*, 2009.

Os impactos socioambientais associados às inundações se dão devido à ocupação humana das regiões ribeirinhas. Historicamente, comunidades se formaram ao longo dos rios devido, principalmente, ao clima, relevo, solo, disponibilidade de alimento e água (Cheliz *et al.*, 2023). A baixa frequência das inundações causou uma falsa ideia de segurança, ocasionando maior adensamento populacional. No entanto, a ocorrência dos eventos de cheia tornaram-se mais recorrentes em detrimento das mudanças climáticas (Neto *et al.*, 2025).

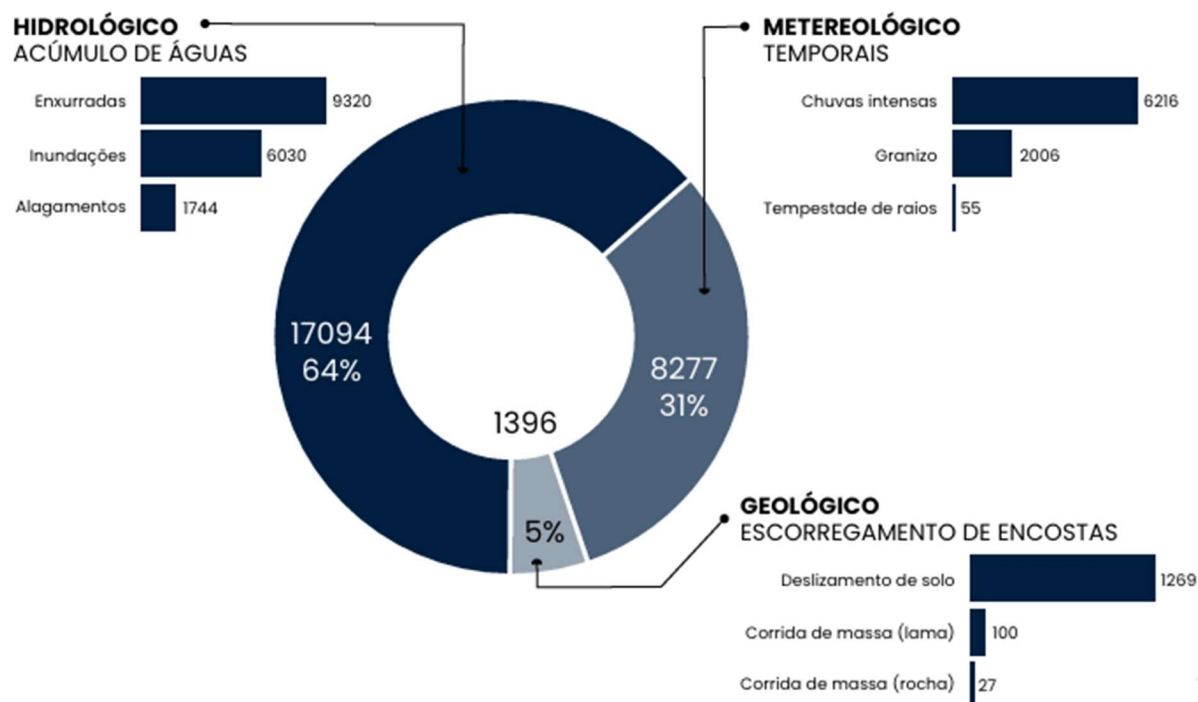
Somado a isso, as modificações no uso e cobertura do solo também alteraram o ciclo hidrológico, agravando os riscos associados à ocupação não ordenada nas planícies de inundação, pois a maior impermeabilidade do solo acelera o escoamento e a descarga de água à jusante. Com isso, há elevação da vazão, diminuição do tempo de pico, bem como ampliação das áreas inundáveis (oposto da condição natural) (Guan *et al.*, 2023).

As consequências dependem da intensidade do evento, permeando danos ecológicos, econômicos e à vida humana. Além dos efeitos negativos diretos, como a obstrução de vias públicas, destruição de residências/obras públicas, óbitos, existem também os indiretos. Desses, destacam-se os associados à saúde, como a contaminação da população por doenças de veiculação hídrica (leptospirose, hantavírus, dengue) e o agravamento de doenças mentais. Vale salientar que, embora toda a população local seja impactada, a veemência é maior para os habitantes socialmente vulneráveis, causando uma disrupção no sistema social (Hernandez *et al.*, 2025; Mantovani *et al.*, 2025, Da Silva *et al.*, 2025).

3.1.2 Eventos extremos de cheia recentes no Brasil

Os eventos extremos de cheia têm se intensificado no Brasil nas últimas décadas, configurando-se como um dos principais desastres ambientais do país. Dados do Sistema Integrado de Informações Sobre Desastres (S2ID), apontam que entre 1991 e 2023 foram registrados cerca de 27 mil desastres climáticos relacionados a chuva, alcançando bilhões de reais em danos à infraestrutura urbana, habitação, agricultura, sistemas de transporte e abastecimento humano (BRASIL, 2024; BRASIL., 2025). Na Figura 2, é possível visualizar a distribuição dos registros do S2ID.

Figura 2 - Categorização dos registros de desastres ambientais relacionados com chuvas intensas no Brasil.



Fonte: adaptado de BRASIL, 2025.

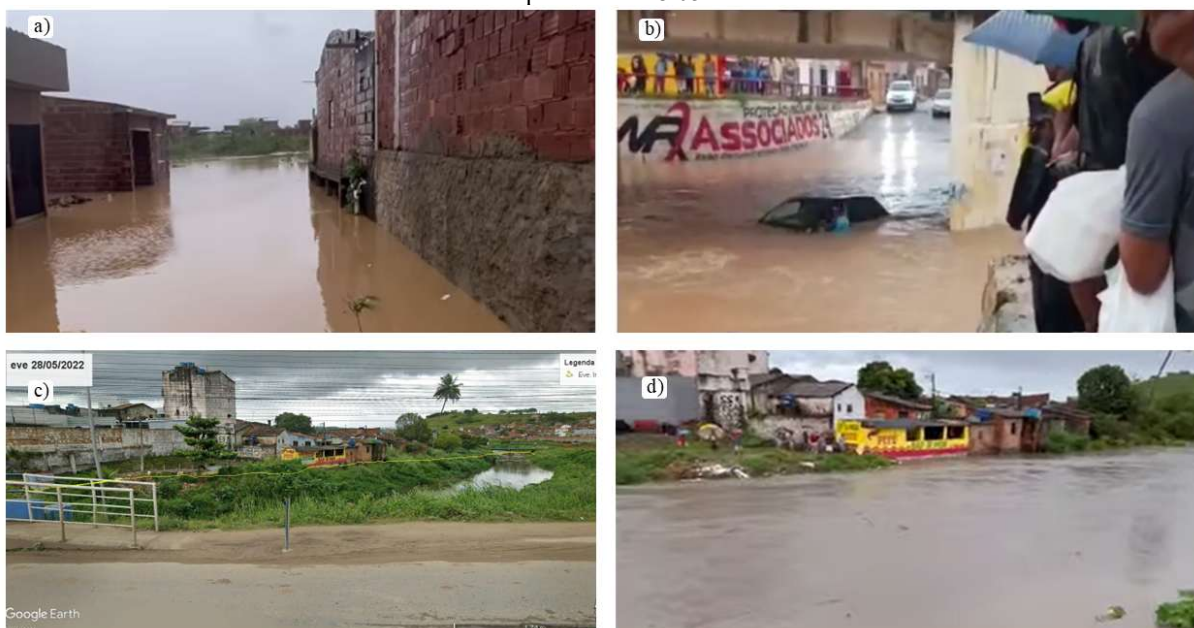
Das regiões do Brasil, destacam-se o Sul, o Sudeste (juntos somam 70% dos registros) e o Nordeste (maior número de municípios atingidos) como as mais impactadas por eventos extremos hidrológicos de cheias. Isso se dá em função de um conjunto de características, entre variabilidade climática, mudanças no uso e ocupação do solo, elevada urbanização e crescente vulnerabilidade socioambiental (BRASIL, 2024; BRASIL 2025).

Sobre a região Sul, destaca-se a catástrofe do Rio Grande do Sul em 2024. As chuvas intensas iniciadas no final de abril e intensificadas no início de maio de 2024 provocaram precipitações acumuladas de, aproximadamente, 500 mm em 5 dias na região metropolitana de Porto Alegre. Esse volume pluviométrico resultou na elevação histórica do nível do lago Guaíba, cujo pico de 5,53 m ultrapassou o observado na cheia de 1941 (4,76 m), até então considerada a maior da série histórica (Collischonn *et al.*, 2025; Mantovani *et al.*, 2025; Marengo *et al.*, 2025). A inundação afetou extensas áreas urbanas e rurais, submergindo bairros inteiros de algumas cidades, como Porto Alegre, Eldorado do Sul, Triunfo e Canoas, comprometendo serviços essenciais como os sistemas de abastecimento e a mobilidade urbana. Além disso, foram constatados 170 óbitos, dezenas de pessoas desaparecidas e centenas de feridos, além de aproximadamente 600 mil pessoas desalojadas ou desabrigadas em todo o estado (Hernandez *et al.*, 2025; Mantovani *et al.*, 2025; Neto *et al.*, 2025).

No Nordeste brasileiro, a cheia ocorrida em 2022 no estado de Pernambuco, é considerada o maior desastre de natureza hidrológica do estado, com precipitação acumulada de, aproximadamente, 500 mm na região metropolitana de Recife. O evento ocorreu entre os dias 25 e 28 de maio de 2022, resultando na inundação de 80% da área habitada de Recife, com 133 óbitos em todo estado, devido à inundação e a movimentos de massa, ultrapassando os valores da cheia de 1975, até então a maior do estado (Nóbrega, 2022; Freitas, 2023; Silva *et al.*, 2025).

Os municípios de Vitória de Santo Antão e Pombos, situados na Zona da Mata pernambucana, também foram afetados pelas chuvas intensas ocorridas em maio de 2022. Em 24 horas choveu cerca de 25% (~103 mm) do esperado para o mês em Vitória de Santo Antão, resultando no transbordamento do rio Tapacurá ao atingir 2,78 m com vazão de 53,3 m³/s, inundando parte da área urbana e rural do município. O fenômeno também foi observado em Pombos. Nos dois casos o rio Tapacurá cruza a área urbana dos municípios (Prefeitura da Vitória de Santo Antão, 2022; Prefeitura de Pombos, 2022; Marengo *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2025). A Figura 3 contém algumas imagens das inundações que ocorreram no ano de 2022 em Vitória do Santo Antão.

Figura 3 - Exemplos de inundações observadas no município de Vitória do Santo Antão (PE) em diferentes dias de 2022. a) 28/05/22; b) 03/06/22; c) trecho do rio Tapacurá que cruza o centro do município; e d) inundações do rio Tapacurá em 28/05/22.



Fonte: imagens Google, 2022.

3.1.3 Modelagem hidrológica de cheias

Modelos hidrológicos (MHs) são ferramentas que representam por meio de equações os fenômenos do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica. Os MHs podem ser classificados de acordo com suas abordagens conceituais, podendo ser concentrados ou distribuídos. Os primeiros não consideram a variabilidade espacial da bacia hidrográfica, tratando-a como uma única unidade, os parâmetros e variáveis são constantes. Já os distribuídos representam a bacia hidrográfica discretizada em elementos menores, considerando a variabilidade espacial das características físicas e meteorológicas da bacia, como tipo de solo, cobertura vegetal, precipitação e relevo. Como exemplo, existem os modelos baseados no MDE, onde cada célula da matriz é tratada como uma unidade de resposta hidrológica (Tucci, 2005; Paz *et al.*, 2011).

Os MHs são ainda agrupados de acordo com a variabilidade temporal: contínuo, quando representam longos períodos, assimilando os momentos de estiagem e cheia em uma bacia hidrográfica; por evento, quando modelam a resposta hidrológica para eventos isolados de precipitações, com curta duração, de horas a alguns dias (Tucci, 2005). A simulação hidrológica utilizando modelos computacionais avançou rapidamente e os modelos computadorizados tornaram-se ferramentas essenciais para compreender as influências humanas nos fenômenos hidrológicos (Orth *et al.*, 2015). Os MHs podem ser aplicados para simular o efeito de alterações no uso e cobertura do solo (Mayou *et al.*, 2024) e das mudanças climáticas (Ferreira *et al.*, 2025) na geração do escoamento, para mapeamento de áreas inundáveis (Breckenfeld *et al.*, 2025), para estudo da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica (Cunha *et al.*, 2025), em sistemas de previsão e alerta etc.

Os MHs chuva-vazão podem ser úteis, dentre as aplicações, para análise das vazões máximas e suas consequências, por sua eficiência na geração do hidrograma de cheia. Nesse caso, essas ferramentas são úteis para entender o comportamento da bacia hidrográfica frente a eventos extremos de precipitação, incluindo, por exemplo, a estimativa da vazão máxima, tempo de pico e forma do hidrograma, auxiliando na tomada de decisão dos atores responsáveis.

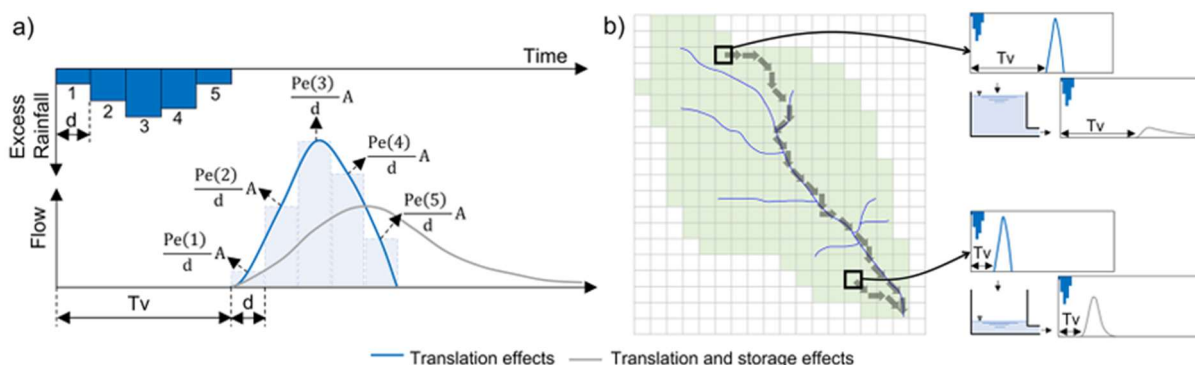
Modelo hidrológico Hidropixel

O Hidropixel é um modelo hidrológico chuva-vazão, baseado no MDE, por evento e determinístico. Proposto inicialmente em Veeck *et al.* (2020), foi incrementado em Lima *et al.* (2024) para a versão dos reservatórios lineares distribuídos (*Distributed Linear Reservoirs* - DLR). O processo chuva-vazão no Hidropixel-DLR pode ser dividido em 3 etapas: estimativa

do tempo de viagem do escoamento, cálculo da chuva excedente e propagação do escoamento. Para o primeiro passo, o escoamento é dividido em superfície e em canal. O tempo de viagem do fluxo em superfície é calculado com base em simplificação da solução da onda Cinemática-Manning, de adaptações da equação de Manning e do método da velocidade demandando parâmetros como o coeficiente de rugosidade Manning.

O tempo de escoamento é determinado com base na estimativa da velocidade média da água por meio da equação de Manning, sendo necessárias informações dos canais, como raio hidráulico, rugosidade e declividade. O tempo de concentração de cada pixel é a soma dos tempos de cada tipo de fluxo (Lima *et al.*, 2024; Lima, 2021). Outrossim, a precipitação efetiva é estimada por meio do método do *Curve Number (CN)* do *Natural Resource Conservation Service (NRCS)* que relaciona tipo e uso do solo para determinar a porcentagem da precipitação disponível para escoar superficialmente (Lima *et al.*, 2024). Para propagação do escoamento, a vazão é dada pelo produto entre a precipitação efetiva e a área do pixel, o hidrograma resultante é então transladado de acordo com o tempo de viagem (Figura 4.a). Por fim, o hidrograma transladado é amortecido pelo reservatório linear simples, controlado pelo parâmetro β , que varia de 0 a 1, sendo que próximo a 1 indica domínio dos efeitos de armazenamento e próximo a 0 implica mínimo amortecimento (Figura 4.b). Essa operação é repetida para todas as células da matriz do MDE (Lima, 2021).

Figura 4 - Representação esquemática da determinação do hidrograma no modelo Hidropixel-DLR. a) efeito de translação do hidrograma de um pixel qualquer. b) exemplificação do efeito de armazenamento de acordo com o tempo de viagem do escoamento do pixel. Na ilustração, a região em verde é a discretização da bacia hidrográfica, a linha em azul é a rede de drenagem e as setas em azul o caminho de fluxo do pixel até o exutório.



Fonte: Lima *et al.*, 2024.

O Hidropixel-DLR foi aplicado em alguns estudos. Lima *et al.* (2024), por exemplo, simularam 15 eventos ocorridos na bacia hidrográfica do alto curso do rio Medway (250 km²), na Inglaterra, com lâminas variando de 6,7 a 22 mm em poucas horas. Os oito primeiros eventos

foram utilizados para calibração do modelo, o restante para validação. O modelo representou bem os eventos simulados com erro médio do tempo de pico de 10% e da vazão de pico de 6%, obtendo valor médio do NSE de 0,89, considerado adequado (Van Liew *et al.*, 2007).

Outrossim, Pereira *et al.* (2024) aplicaram o Hidropixel-DLR na bacia hidrográfica do posto fluviométrico Mulungu (38750000) da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA). Inserida na bacia hidrográfica do Rio Mamanguape (PB) possui área total de, aproximadamente, 879 km². O período analisado possui um total de 59 dias (17/06/2011 a 14/08/2011), comportando-se como simulação contínua. Os autores modelaram três cenários: chuva espacialmente distribuída na bacia hidrográfica, chuva média (obtida através do método dos Polígonos de Thiessen) e desconsideração do efeito da Evapotranspiração Potencial (ETP). Nesse sentido, o caso da chuva espacialmente distribuída resultou NSE de 0,58 e erro absoluto da vazão de pico de 0,81 m³/s. Para a rodada com chuva média a resposta foi insatisfatória, com NSE de 0,24 e erro absoluto da vazão de pico igual a 53,25 m³/s e vazão de pico igual a 413,13 m³/s. Por fim, a simulação sem ETP foi o resultado mais insatisfatório, com NSE de 30% e erro absoluto de 39,82 m³/s e vazão de pico igual a 399,7 m³/s.

Breckenfeld *et al.* (2025) aplicaram o Hidropixel-DLR na bacia hidrográfica do alto curso do Rio Tapacurá (283km²), em Pernambuco, focando na área urbana de Vitória de Santo Antão, que possui histórico recorrente de inundações. O estudo analisou o evento de cheia ocorrido entre 22 e 23 de junho de 2022, com acumulados de chuva entre 50 e 70 mm. O modelo foi combinado com o descritor de terreno *Height Above the Nearest Drainage* (HAND) para estimar as regiões suscetíveis a inundação. As análises compararam a precisão das manchas de inundação geradas por um limiar único de HAND *versus* limiares distintos derivados de curvas-chave sintéticas. O modelo hidrológico foi utilizado para determinar a vazão máxima nas confluências dos afluentes com o rio principal, a partir do valor obtido e da curva-chave sintética obteve-se o nível respectivo da água, esse foi definido como limiar do HAND. Com isso, observou-se que o método com limiares distribuídos apresentou desempenho superior e evitou a superestimativa de inundações em riachos de menor ordem, embora ainda necessite de refinamentos em zonas de confluência.

3.2 Efeito da trajetória de tormentas

3.2.1 Relevância para formação de cheias

O processo de transformação chuva-vazão depende de alguns fatores, dentre eles: características da bacia hidrográfica e dinâmica da precipitação. Os aspectos da bacia estão associados à sua área, rede de drenagem, tipo do solo, uso do solo e suas interações. A precipitação é caracterizada por sua intensidade, duração, total precipitado, direção e velocidade. De todas as características citadas, a intensidade, direção e velocidade podem variar no espaço e no tempo ao longo da bacia hidrográfica. A precipitação é o fator mais influente na transformação chuva-vazão, pois a forma e estrutura do hietograma condicionam a propagação do escoamento superficial (Singh, 1997; Ghomash 2024).

A variabilidade espaço-temporal da chuva e, conseqüentemente, o escoamento superficial, depende do seu movimento. Uma precipitação com mesma duração, intensidade e acumulação pode ocorrer em uma bacia hidrográfica com diferentes direções e velocidades, resultando respostas hidrológicas variáveis (Emmanuel *et al.*, 2015; Gao *et al.*, 2019). Isso se dá, pois, altera-se o escoamento superficial e a formação de cheias, influenciando diretamente a magnitude do pico da vazão, o tempo de pico e a forma do hidrograma. Além disso, esse fenômeno é controlado pelos sistemas precipitantes da bacia hidrográfica. Por isso, considerá-los pode melhorar a representatividade dos processos que governam o ciclo hidrológico, haja vista que a precipitação tende a não se comportar de forma estacionária sobre uma bacia, especialmente em bacias de maiores dimensões. Somado a isso, espera-se que eventos extremos com maior variabilidade espaço-temporal ocorram devido às alterações climáticas (Fang *et al.*, 2019; Ghimire *et al.*, 2021; Ghomash, 2024).

A trajetória das tormentas manifesta-se principalmente através da direção do movimento da precipitação, que dita como será a interação da água com a superfície. A direção mais crítica citada na literatura é aquela que segue o sentido do fluxo do rio principal até o exutório da bacia hidrográfica. Nesse caso, o escoamento gerado na cabeceira leva um tempo maior para contribuir com vazão no exutório. Com isso, ocorre uma superposição dos escoamentos, pois o escoamento superficial gerado nas partes superiores da bacia acompanha o movimento da chuva nas áreas inferiores. A resposta hidrológica implica na ascensão rápida do hidrograma, em vazões de pico mais elevadas e maior volume. Outrossim, para o sentido oposto, a propagação da tormenta ocasiona o amortecimento do hidrograma, com vazões reduzidas e maior tempo de base, porém, o fluxo inicia nos primeiros instantes, pois o tempo

de viagem do escoamento é muito menor nas proximidades do exutório (Singh, 1997; de Lima *et al.*, 2002; Gao *et al.*, 2019). Essa diferença entre os sentidos de montante para jusante (*downstream*) e de jusante para montante (*upstream*) é chamada de *directional bias* (Niemczynowicz, 1984).

Somado à direção, a velocidade controla o tempo de permanência da tormenta e a interação dos aportes de precipitação com a bacia hidrográfica. Velocidades elevadas diminuem o tempo de ocorrência da chuva na bacia, reduzindo o volume precipitado, o tempo de base, a vazão de pico e prorrogando o tempo de pico. Para velocidades menores, observa-se um hidrograma mais intenso, com maior volume, maior vazão de pico e maior tempo de base. Assim, a relação entre o tempo de deslocamento da precipitação sobre a bacia e os tempos característicos de propagação do escoamento pode intensificar ou suavizar a resposta hidrológica. O caso mais crítico ocorre quando a velocidade da tormenta se aproxima da média da velocidade do fluxo no canal, ocasionando a soma dos aportes de água no sistema de drenagem, potencializando os picos de vazão, fenômeno conhecido como ressonância (Singh, 1997; Gao *et al.*, 2019).

3.2.2 Ferramentas computacionais para criação de trajetórias de tormentas

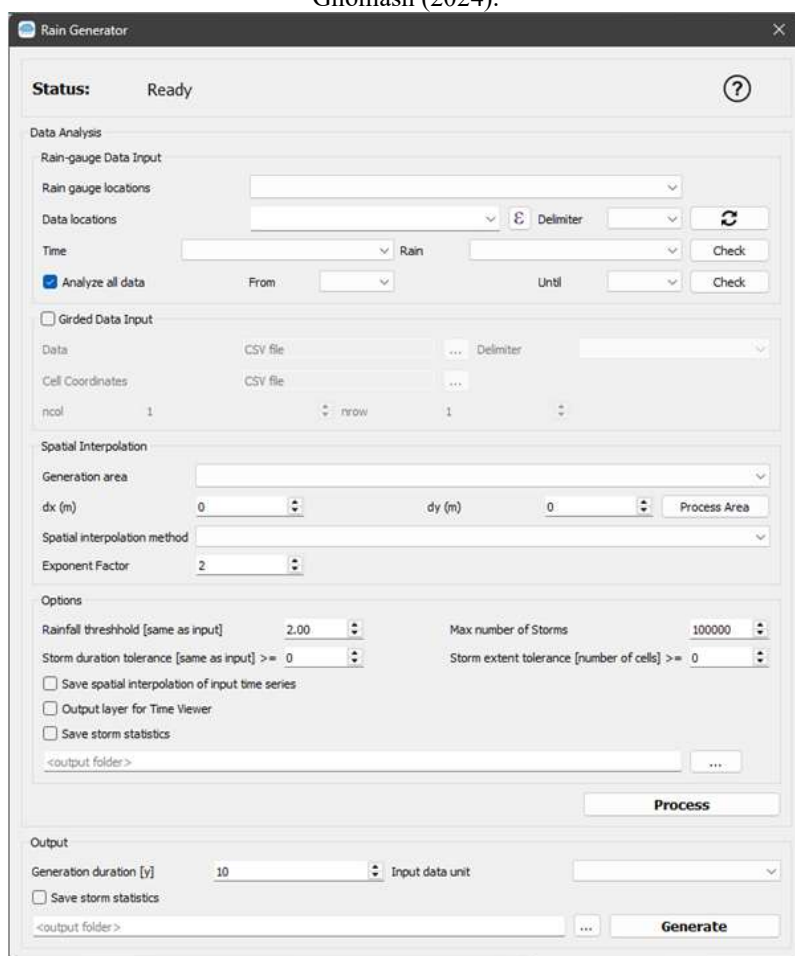
O monitoramento dos eventos extremos de precipitação e das suas consequências são fundamentais para entender a dinâmica dessa variável climática. Um exemplo são os produtos de radares, que utilizam técnicas de sensoriamento remoto para coletar informações sobre a precipitação. Esses conseguem monitorar a precipitação de forma distribuída no tempo e no espaço. No entanto, não são todas as regiões que possuem essa tecnologia ou deseja-se estudar uma precipitação com aspectos específicos, como certa direção e velocidade. Nesse cenário, existem as chuvas sintéticas idealizadas a partir de ferramentas computacionais. Em geral, são construídas de modo a carregar atributos de eventos reais (Ghomash, 2024).

Ghomash (2024) implementou um gerador estocástico dinâmico de campos de precipitação baseado na abordagem de Análise Probabilística Espaço-Temporal Dinâmica (DSTPA). Seu objetivo foi incorporar a trajetória de tormenta para análise do escoamento superficial. O sistema proposto identifica eventos de precipitação como aglomerados (*clusters*) de dados relacionados no espaço e no tempo, criando hietogramas sintéticos, conservando propriedades físicas, como a variabilidade espaço temporal de cada evento. Os parâmetros fundamentais da aplicação incluem o volume total precipitado, a intensidade de pico, a extensão

espacial e a sazonalidade, sendo os eventos gerados estatisticamente consistentes com os registros históricos observados. O autor integrou o sistema ao SIG QGIS como um complemento, objetivando utilizar as funcionalidades do software para tratamento e preparação dos dados de entrada.

Para aplicação do modelo o autor utilizou como área de estudo a bacia hidrográfica do Rio Kan (836 km²), na província de Teerã, Irã, uma região de clima semiárido sujeita a inundações. Os dados utilizados para validação foram retirados do *Radar Online Aneichung* (RADOLAN), operado pelo serviço meteorológico da Alemanha. Adicionalmente, a aplicação integra o processo de chuva-vazão ao ser acoplada com o modelo hidrodinâmico ProMaides (*Protection Measures against Inundation Decision support*). O autor considerou três períodos de retorno (10, 100 e 1000 anos) e duas durações diferentes (8 e 16 horas). A partir da curva Intensidade, Duração e Frequência (IDF) foram gerados 6 eventos. Na Figura 5, é possível visualizar a interface gráfica do complemento proposto por Ghomash (2024) adicionado ao QGIS.

Figura 5 - Interface gráfica da tela principal do complemento *Rain Generator* do QGIS, desenvolvido por Ghomash (2024).

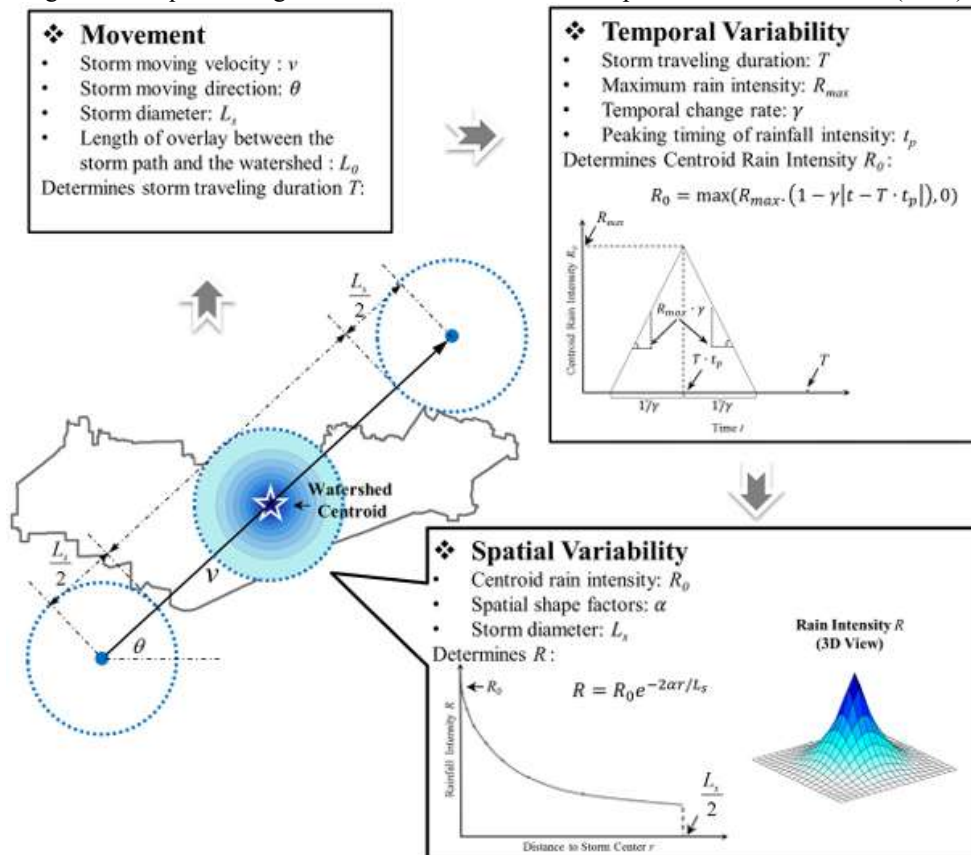


Fonte: Ghomash, 2024.

Gao *et al.* (2019) também propuseram um gerador de tormentas, chamado de *Dynamic Moving Storm* (DMS). No DMS, a chuva sintética criada possui variabilidade espaço-temporal e assimila a velocidade e direção da tormenta. A precipitação é gerada a partir de equações lineares e exponenciais estabelecidas a partir de observações dos padrões das células de chuva (*rain cell*) obtidas a partir de radar. As tormentas nesta metodologia são círculos contendo uma distribuição exponencial da precipitação, quanto mais distante do centro, menor o valor. Os parâmetros demandados são a intensidade máxima e duração da chuva, o raio, a velocidade e os parâmetros que condicionam a forma da espacialização no círculo.

A bacia hidrográfica do rio Brays Bayou (334 km²), localizada em Houston, Texas, foi utilizada para teste da ferramenta. Os autores consideraram as direções de tormenta variando de 0° a 360° (obrigatoriamente cruzando o centroide da bacia hidrográfica), a faixa de velocidade simulada foi de 0,5 a 20 km/h. Os hietogramas resultantes foram inseridos no modelo hidrológico HEC-HMS para simulação chuva-vazão. A Figura 6 contém a esquematização da metodologia descrita em Gao *et al.* (2019).

Figura 6 - Esquema do gerador dinâmico de tormentas apresentado em Gao *et al.* (2019).

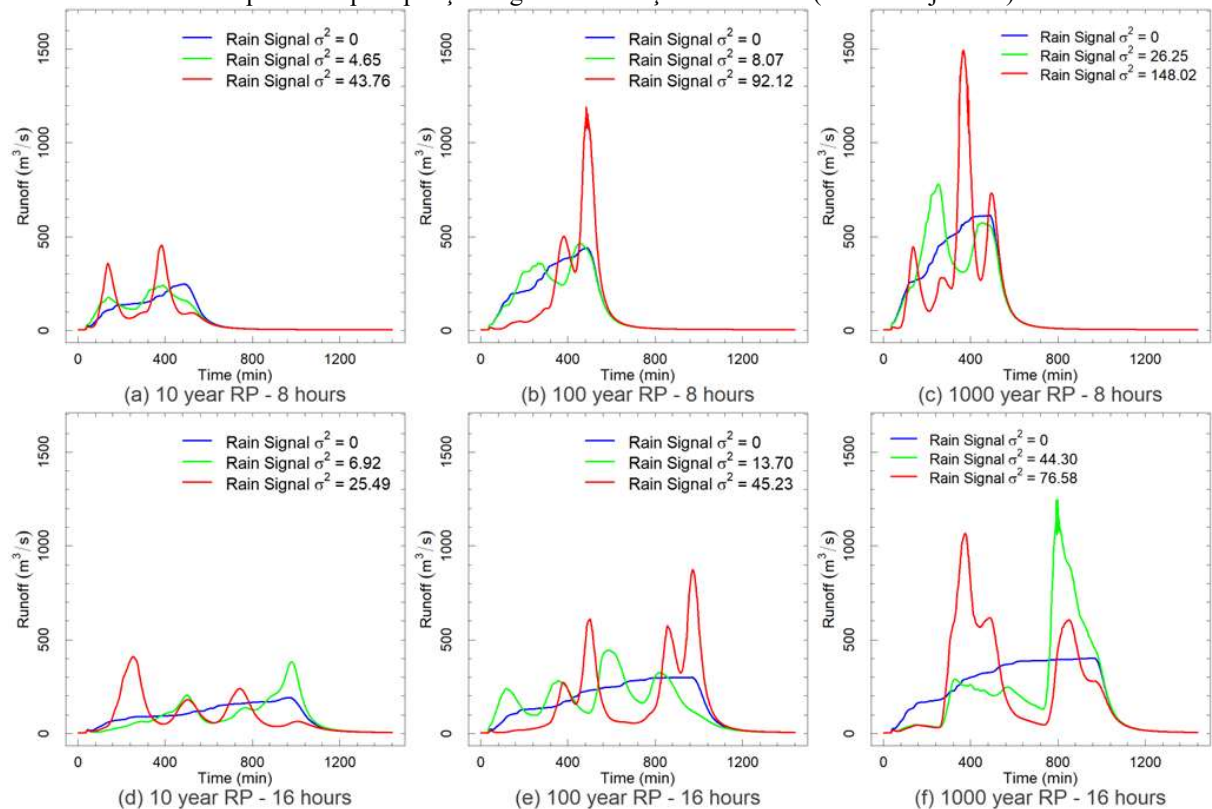


3.2.3 Estudos de simulação da trajetória de tormentas

Comprovando o fenômeno descrito anteriormente, Ghomash (2024) observou que tormentas móveis e uniformes com diferentes padrões temporais de precipitação diferem tanto nos valores de vazão de pico quanto estrutura do hidrograma. A precipitação uniforme é considerada o caso de referência das análises. Com isso, ao avaliar a variabilidade temporal da precipitação (quantificada pela variância do hietograma, σ^2) no processo chuva-vazão, o autor observou que a forma do hidrograma responde diretamente à estrutura temporal do hietograma, de modo que, em termos gerais, sinais de chuva mais variados tendem a produzir maiores vazões de pico e a alterar a dinâmica de resposta (Figura 7.a, b, c, d, e). No entanto, os resultados também mostraram que essa relação não é estritamente linear: há situações em que um hietograma com maior intensidade máxima não gera, necessariamente, o maior pico de vazão, sugerindo que a distribuição temporal do volume, e não apenas o pico de intensidade, controla a geração do escoamento superficial (Figura 7.f).

Os hidrogramas das chuvas supracitadas, deslocando-se de oeste para leste sob diferentes velocidades, são apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Hidrogramas para os seis eventos estabelecidos por Ghomash (2024) para diferentes variações temporais da precipitação seguindo a direção oeste-leste (montante-jusante).



Fonte: Ghomash, 2024.

Gao *et al.* (2019), diferentemente de Ghomash (2024), aplicaram a Análise de Sensibilidade Global (GSA) para avaliar a influência dos parâmetros do gerador de tormentas na vazão de pico. Os resultados indicaram que a velocidade de deslocamento da chuva é o parâmetro mais sensível, exercendo a maior influência sobre a variação do pico de vazão. Essa influência ocorre tanto de forma individual quanto, de maneira ainda mais significativa, através de interações complexas com os outros parâmetros da tormenta. Os autores notaram que parâmetros que afetam diretamente o volume total de chuva – como o diâmetro da tormenta, o fator de forma espacial e a taxa de mudança temporal (Figura 6) – geraram índices de sensibilidade total mais altos do que a direção ou o momento do pico de intensidade, sugerindo que, na bacia estudada, o volume de escoamento é um fator dominante.

Ao aprofundar a investigação através da Análise de Sensibilidade Par a Par (PSA), os autores confirmaram que o pico de vazão é amplificado quando os campos de precipitação se movem para jusante ao longo do canal principal. Foi identificado um fenômeno de ressonância quando a tormenta viaja a uma velocidade crítica (cerca de 5 km/h, no caso do Brays Bayou), que corresponde à velocidade próxima a média do escoamento no canal. Essa condição implica na superposição temporal do escoamento, minimizando a dispersão temporal dos hidrogramas e elevando a vazão de ponta na saída da bacia. Continuando, Gao *et al.* (2019) observaram que a velocidade do campo de precipitação que gera o maior pico de vazão é geralmente superior àquela que gera o maior volume de escoamento. Isso ocorre porque o aumento da velocidade reduz a duração da chuva sobre a bacia (diminuindo o volume precipitado), mas pode aumentar a concentração espacial da chuva, compensando a perda de volume com uma resposta hidrológica mais rápida e concentrada.

Em relação à variabilidade espacial, os resultados mostraram que tormentas com diâmetros menores ou com taxas de decaimento espacial da intensidade (α , Figura 6) mais acentuadas resultam em uma maior concentração espacial da chuva. Isso reduz a dispersão temporal do escoamento e contribui para picos mais elevados. Além disso, a interação entre o diâmetro do círculo de chuva e sua velocidade altera o ponto de ressonância. Haja vista que, diâmetros maiores requerem velocidades de deslocamento mais altas para atingir a superposição ideal de fluxos na saída da bacia (Gao *et al.*, 2019).

Outrossim, a variabilidade temporal da intensidade da chuva também influenciou os resultados. O parâmetro de tempo de pico (t_p , Figura 6), em conjunto com o movimento da tormenta, determina a localização geográfica da intensidade máxima da precipitação em relação

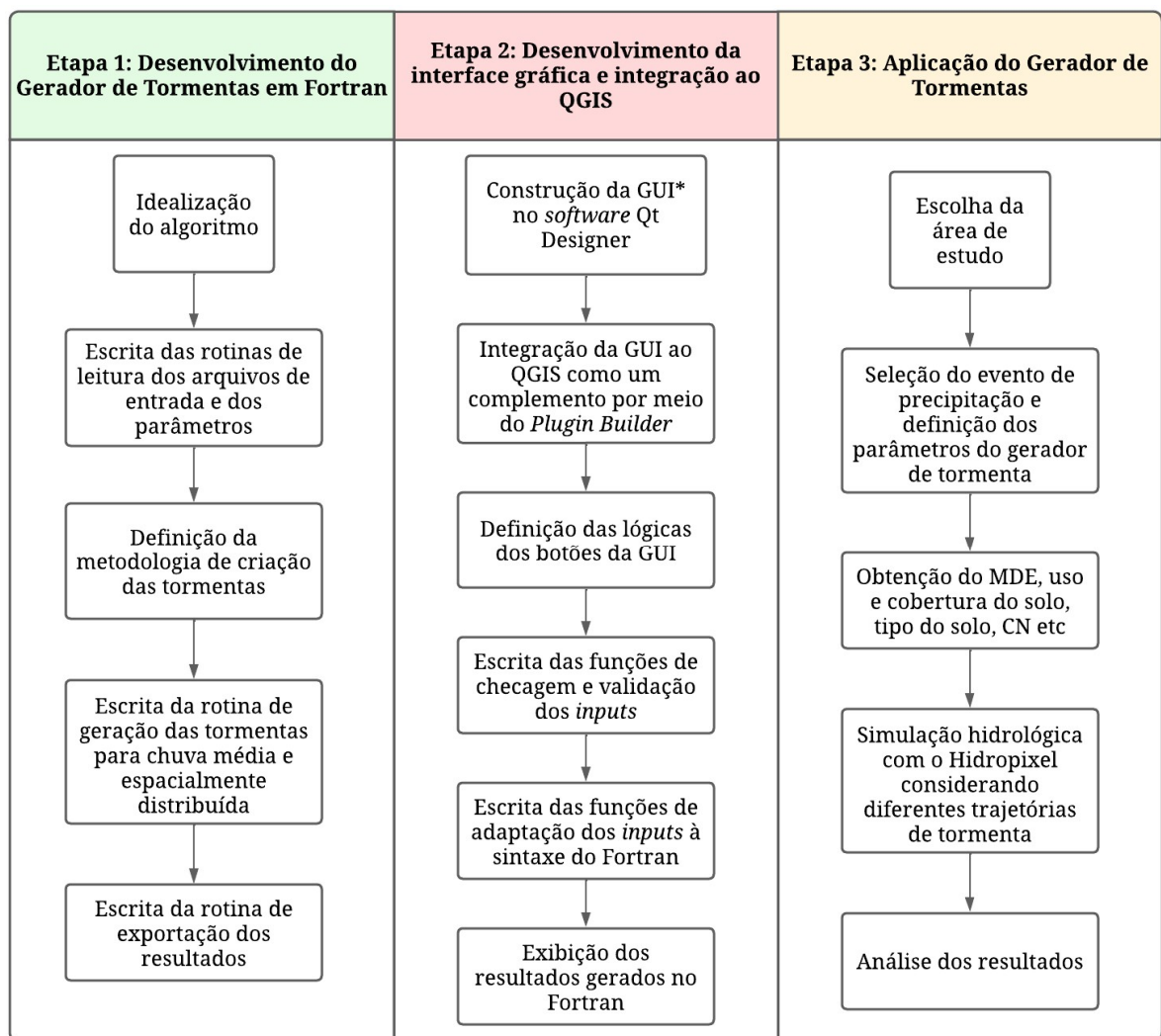
à rede de drenagem. Quando o pico de intensidade ocorre cedo, a intensidade máxima concentra-se nas cabeceiras, fazendo com que o escoamento sofra maior atenuação ao longo do canal. Por outro lado, quando o pico ocorre mais tarde, a chuva intensa concentra-se perto da saída da bacia, gerando escoamento com pouca ou nenhuma atenuação e picos mais altos (Gao *et al.*, 2019).

4. METODOLOGIA

4.1 Visão geral

A metodologia desta pesquisa foi sistematicamente dividida em três etapas, sendo elas: desenvolvimento do executável do Gerador de Tormentas, criação da interface gráfica e integração ao QGIS e, por fim, aplicação da ferramenta para simulação hidrológica com o Hidropixel. Nesse sentido, a Figura 8 ilustra o fluxograma metodológico.

Figura 8 - Fluxograma metodológico da pesquisa.



*Graphical User Interface

Fonte: autor, 2026.

A etapa inicial consistiu no desenvolvimento de rotinas em linguagem de programação *Fortran 90* do gerador de tormentas, ferramenta computacional proposta nessa pesquisa. Posteriormente, visando tornar a utilização do gerador de tormentas mais intuitiva, criou-se uma

interface gráfica que foi integrada ao QGIS como um complemento. Ainda nesta etapa, um conjunto de funções de checagem e validação dos dados de entrada foram criadas para evitar erros na execução da ferramenta.

A fim de avaliar os efeitos da trajetória de tormenta na geração e propagação do escoamento, foi realizada modelagem hidrológica com o Hidropixel-DLR na bacia hidrográfica do alto curso do rio Tapacurá (PE). Um evento de cheia foi escolhido para definição dos parâmetros do gerador de tormentas. Diferentes trajetórias foram pensadas para análise mais detalhada.

4.1.1 Algoritmo de geração de campos espaço-temporais de precipitação

Os campos espaço-temporais de precipitação carregam características sobre seu movimento, como a direção, sentido e velocidade. Como discutido na seção 3.2 *Efeito da trajetória de tormenta*, essas variáveis interferem diretamente na transformação da chuva em vazão. Nesse sentido, este tópico apresenta as considerações feitas para conceber o Gerador de Tormentas e todos os processos para gerar chuvas sintéticas com diferentes direções, sentidos e velocidades.

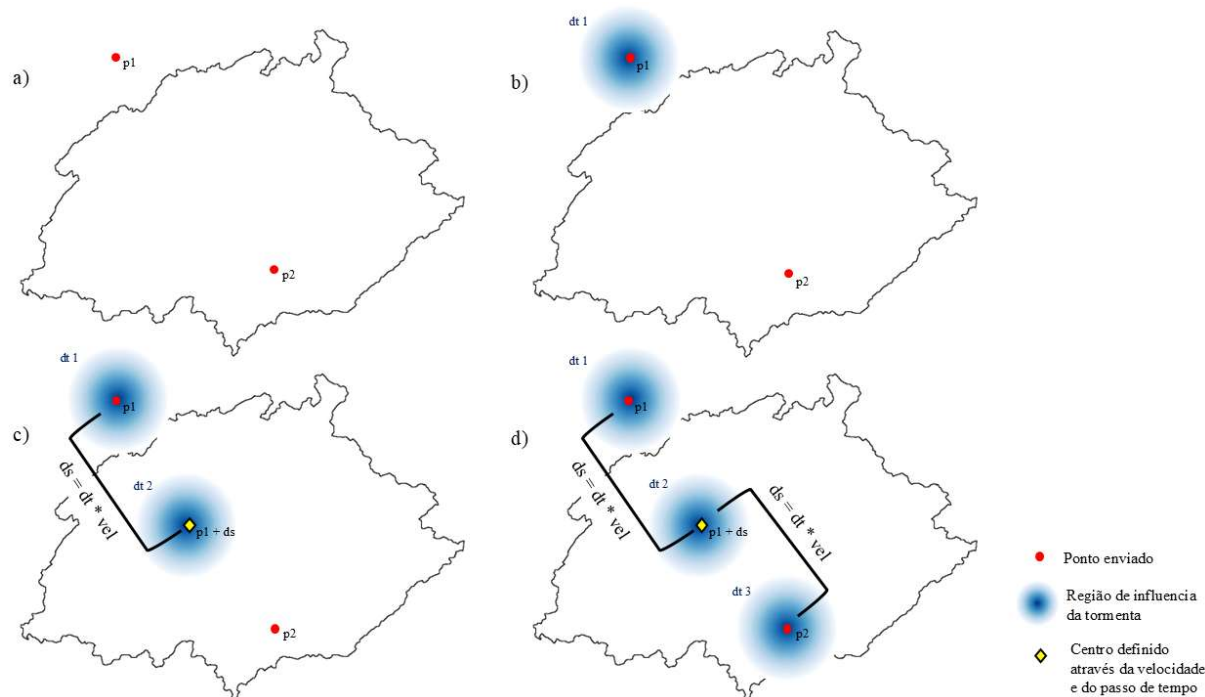
As rotinas computacionais para criação dos campos espaço-temporais de precipitação foram escritas em linguagem de programação Fortran 90, devido sua elevada performance em cálculos matemáticos (Guo *et al.*, 2022). Os arquivos necessários são: matriz da delimitação da bacia hidrográfica e o vetor de pontos com a trajetória da tormenta. Além disso, os parâmetros são: velocidade [m/min] e o raio [m] da tormenta. Foram implementadas duas abordagens para definição da precipitação: espacialmente distribuída e uniforme.

A concepção dos campos espaço-temporais de precipitação foi baseada na metodologia apresentada em Gao *et al.* (2019), dividida em três módulos: variabilidade espacial da intensidade da chuva, variabilidade temporal da intensidade da chuva e movimento da tormenta. O primeiro módulo refere-se à distribuição espacial da intensidade da precipitação dentro da região da tormenta. O segundo, à mudança do padrão da intensidade da precipitação de acordo com o tempo. O último à mudança da posição da tormenta em um plano horizontal de duas dimensões (x, y – a matriz de delimitação da bacia hidrográfica).

O algoritmo foi estruturado da seguinte maneira: fornecidos os arquivos de entrada e os parâmetros (velocidade e raio), o primeiro passo é a leitura dos pontos da trajetória da tormenta

para definição da região de interesse de cada passo de tempo. A região de interesse é definida com base no ponto lido da trajetória (centro) e do raio, formando um círculo (área de ocorrência da tormenta). Após isso, o valor da precipitação é definido de acordo com a escolha do usuário: distribuída ou uniforme na área de interesse. A partir da velocidade e do passo de tempo do evento fornecido, define-se a nova posição da tormenta. A partir desse ponto, o algoritmo torna-se recursivo até finalizar o percurso informado, projetando uma célula de chuva sintética circular com raio constante que se move e evolui no tempo a uma velocidade invariável. A Figura 9 esquematiza o processo descrito.

Figura 9 - Esquematização do processo de definição dos campos espaço-temporais de precipitação do Gerador de Tormentas. a) etapa inicial, usuário define os pontos para estabelecer direção e sentido do percurso; b) definição da região de interesse e da precipitação.



Fonte: autor, 2026

Trajetória e propagação da tormenta

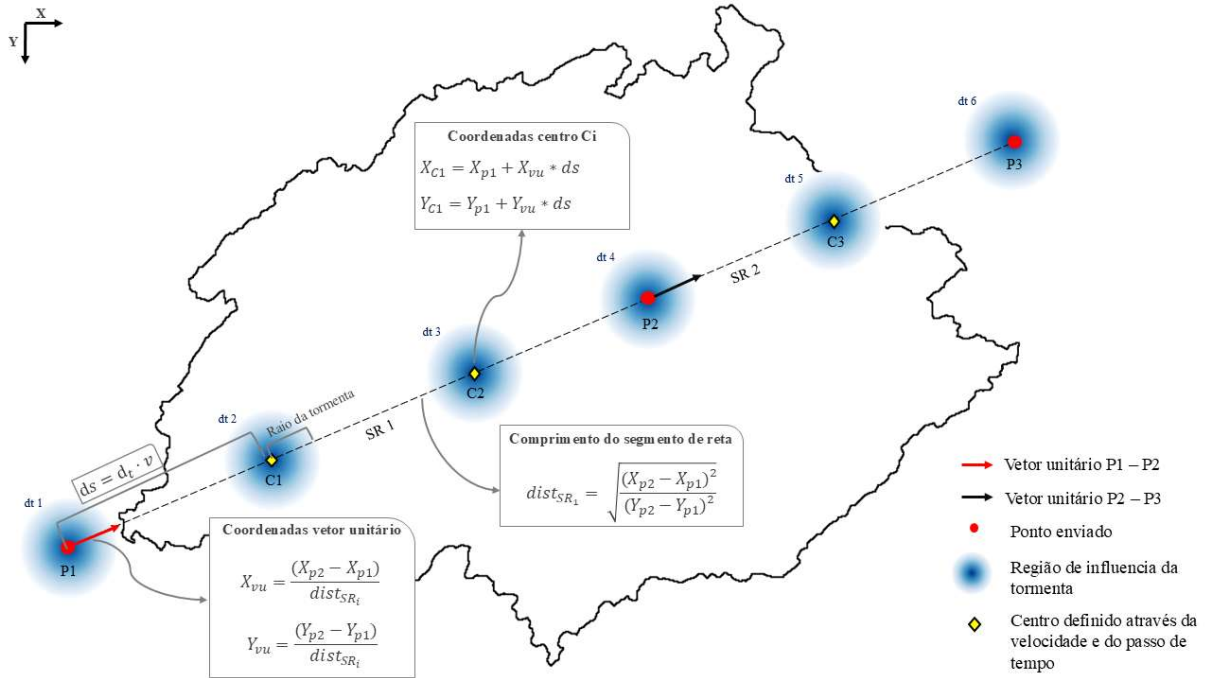
A trajetória da tormenta representa a direção, o sentido e a velocidade com a qual o campo de precipitação percorre a bacia hidrográfica. Em Gao *et al.* (2019), os autores definiram a trajetória da tempestade como uma linha reta que cruza diretamente o centroide da bacia hidrográfica. Variando os ângulos de 0° a 360° , percorreram todas as direções possíveis. Para esse estudo, o método proposto eliminou a obrigatoriedade de o percurso cruzar o centroide da

bacia hidrográfica, sendo então definido por meio de n -pontos que formam segmentos de reta. Com isso, a partir da velocidade e do intervalo de tempo do evento, é possível definir o conjunto de pontos (centros da tempestade para os intervalos de tempos) que estão contidos nos segmentos de reta que constroem o caminho fornecido. Essa modificação reduz a rigidez da forma proposta por Gao *et al.* (2019) no traçado do caminho da tormenta, possibilitando outras análises.

Para estabelecer o sentido, o arquivo vetorial dos pontos deve possuir como atributo o identificador (ID) dado por números inteiros, positivos, crescentes e diferentes entre si. Considerando uma trajetória dada por 3 pontos na direção do canal principal, o sentido difere se a definição dos IDs iniciar da cabeceira até o exutório, seguindo este o caminho natural da água, da definição do exutório até a cabeceira, sentido oposto ao fluxo natural.

Outrossim, a propagação dos campos de precipitação ocorre com base na equação da velocidade, considerando a velocidade informada e o bloco de tempo atual (depende da duração e do intervalo de tempo do evento, ambos informados pelo usuário) calcula-se então a distância percorrida. Entretanto, como a propagação da tormenta pode ocorrer em qualquer direção, torna-se necessário garantir que os centros estimados pela rotina permaneçam contidos no domínio dos segmentos de reta definidos pelos pontos de entrada (SR1 e SR2, Figura 10). Para isso, a cada bloco temporal de precipitação, o programa calcula o vetor unitário entre dois pontos consecutivos da trajetória, P_i e P_{i+1} (por exemplo, P_1 e P_2 , Figura 10), assegurando que o deslocamento da tormenta siga corretamente o caminho especificado pelo usuário. Como o vetor unitário carrega a direção e o sentido do segmento de reta, garante-se que o ponto estimado está seguindo o caminho correto.

Figura 10 - Esquema ilustrativo com equações utilizadas para propagação dos campos espaço-temporais de precipitação do Gerador de Tormentas.



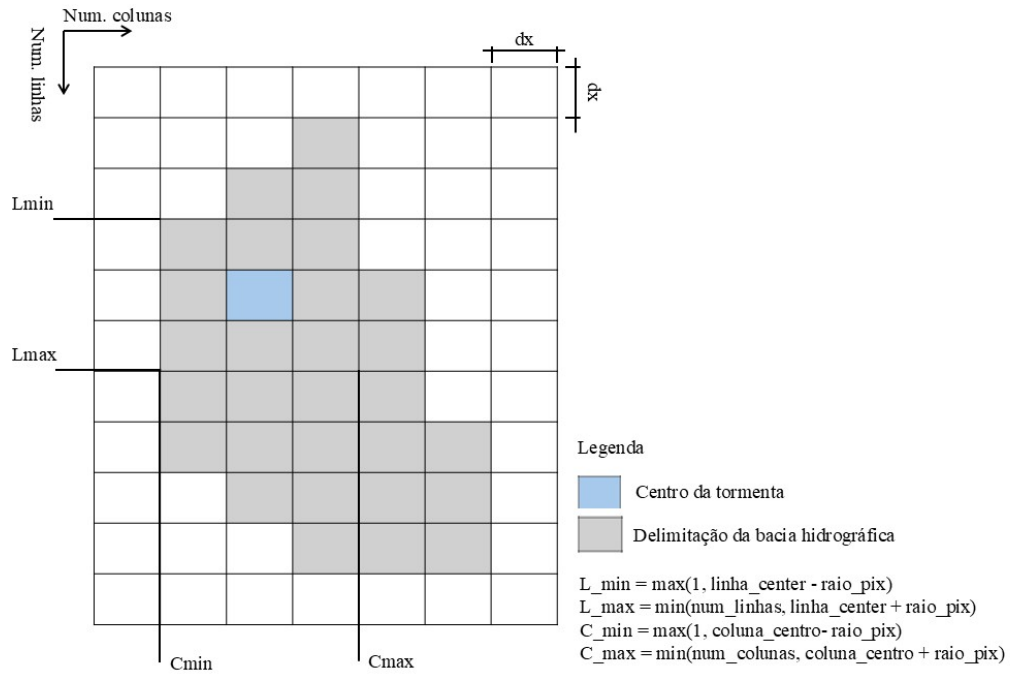
Fonte: autor, 2026.

A quantidade de pontos pertencentes a cada segmento depende diretamente da velocidade, quanto maior, menor o número de centros entre P_i e P_{i+1} . Quando a distância percorrida for maior que o comprimento do segmento de reta SR_i , a rotina define um novo, dado então por P_{i+1} e P_{i+2} . Novamente, o algoritmo torna-se recursivo, repetindo essas etapas até completar a duração do evento. O número de iterações é definido como a divisão entre o passo de tempo e a duração do evento.

Região de interesse

A região de interesse consiste em um círculo de raio fornecido pelo usuário. Cada intervalo de tempo possui um campo de precipitação. A delimitação inicia a partir do primeiro centro enviado pelo usuário, a rotina busca os pixels cuja distância para o centro é menor que o raio. Para otimizar essa etapa, aplicou-se a técnica da *Bounding Box*, estabelecendo um retângulo de dimensões apresentadas na Figura 11. Esse método reduz a quantidade de iterações por reduzir a área de busca. Ao fim dessa etapa, uma nova matriz binária é criada. Os valores iguais a zero representam células fora do campo de interesse, enquanto os iguais a 1 serão modificados, recebendo a nova reorganização da precipitação.

Figura 11 - Representação da definição da *Bounding Box* para otimização da definição da região de interesse do campo de precipitação. Na ilustração, são apresentadas as equações que estabelecem as linhas e colunas iniciais e finais da busca, onde “raio_pix” representa o raio enviado pelo usuário dividido pela resolução espacial da imagem raster. No caso da ilustração, dx.



Fonte: autor, 2026.

No exemplo da Figura 11, considerando um raio igual a um pixel, o retângulo de busca seria definido por Lmin, Lmax, Cmin, Cmax, reduzindo o número de iterações de 28 para apenas 9.

Precipitação espacialmente distribuída

Nesta abordagem, baseada na metodologia proposta em Gao *et al.* (2019), a variação temporal da precipitação segue uma relação linear definida na Equação 1, que permite estimar a intensidade no centro do campo de precipitação. Essa formulação assimila a intensidade máxima do evento observado e a partir dela estabelece a intensidade dos demais intervalos de tempo.

$$R_0 = \max(R_{max} \cdot (1 - \gamma \cdot |t - D \cdot t_p|), 0); 0 \leq t \leq D \quad (\text{Eq. 1})$$

onde R_0 é a intensidade da precipitação no centro da tormenta [mm/h]; R_{max} é a intensidade máxima considerada [mm/h]; γ é a taxa de variação temporal da intensidade da

precipitação em unidade de $[h]^{-1}$, γ igual a zero representa um padrão temporalmente uniforme em toda duração do evento; t é o intervalo de tempo atual em horas; D é a duração do evento $[h]$; e t_p é um parâmetro adimensional que varia entre 0 e 1, representa a posição onde R_{max} ocorre, em porcentagem da duração (D). Para t_p igual a 0,5, o pico da intensidade da precipitação (R_{max}) ocorre quando a tormenta percorreu 50% da duração do evento. Além disso, o operador *max* é empregado para evitar que ocorram intensidades negativas (Gao *et al.*, 2019).

O tempo de permanência da tormenta na bacia hidrográfica depende da duração D e da taxa de variação temporal γ , sendo controlado por D quando a tormenta se move rapidamente, pois o tempo de travessia é pequeno. Nesse cenário, a tempestade entra e sai da bacia antes que a chuva possa parar pelo decaimento temporal (γ). No outro caso, quando a taxa de mudança temporal é alta (valor elevado de γ), a intensidade da precipitação sobe e desce abruptamente. Com isso, a chuva pode cessar antes que a célula da tempestade saia fisicamente da área da bacia (Gao *et al.*, 2019).

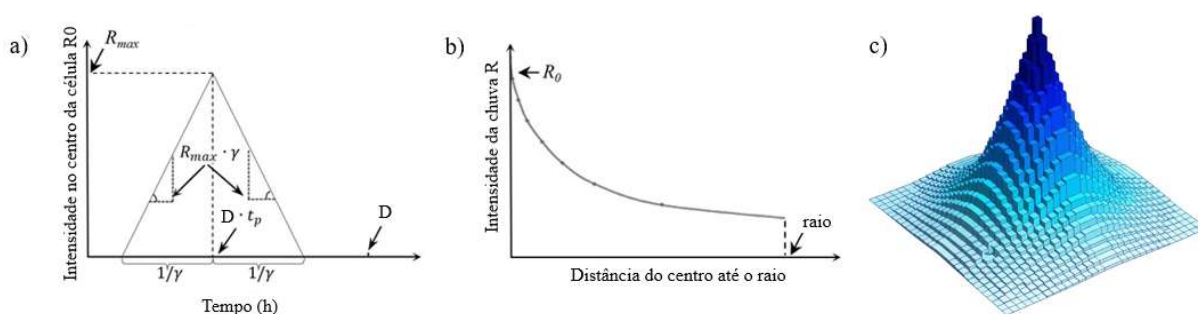
Na sequência, a dinâmica da mudança de padrão espacial dos campos de precipitação ocorre baseada em uma relação exponencial (Equação 2), que gera um decaimento radial no valor da intensidade da precipitação. Essa forma de espacialização foi escolhida por representar com maior realismo a intensidade em células de precipitação. Fato oposto ao observado em distribuições como a gaussiana, que gera uma subestimação da intensidade da precipitação na porção central da célula da tormenta (Hardenberg *et al.*, 2003; Gao *et al.*, 2019).

$$R = R_0 \cdot e^{\frac{-2 \cdot \alpha \cdot d}{r}}, 0 \leq d \leq r \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde R é a intensidade da precipitação no interior da tormenta $[mm/h]$; α é o fator de forma espacial da célula de precipitação [adimensional]; e d é a distância do centro até o raio da região de interesse $[m]$. O parâmetro α define o perfil da tormenta (se ela é plana ou pontiaguda, Figura 12). Na Equação 2, um valor maior de α resulta em um decaimento mais acentuado, significando que a chuva é muito intensa no centro e diminui rapidamente ao passo que a distância aumenta. Por outro lado, um valor menor α reduz a variação espacialmente, quando α é igual a zero a intensidade da chuva é constante em toda a área da tempestade (Gao *et al.*, 2019).

A Figura 12 ilustra a relação temporal (a) e espacial (b) da intensidade da precipitação da tormenta a partir da aplicação da Equação 1 (a) e 2 (b). Em (c) é apresentada a visão em três dimensões de uma célula de precipitação consoante metodologia de Gao *et al.* (2019).

Figura 12 - Representação da variabilidade temporal (a) e espacial (b) a partir da aplicação das Equações 1 e 2. c) ilustra uma célula de precipitação em 3D.



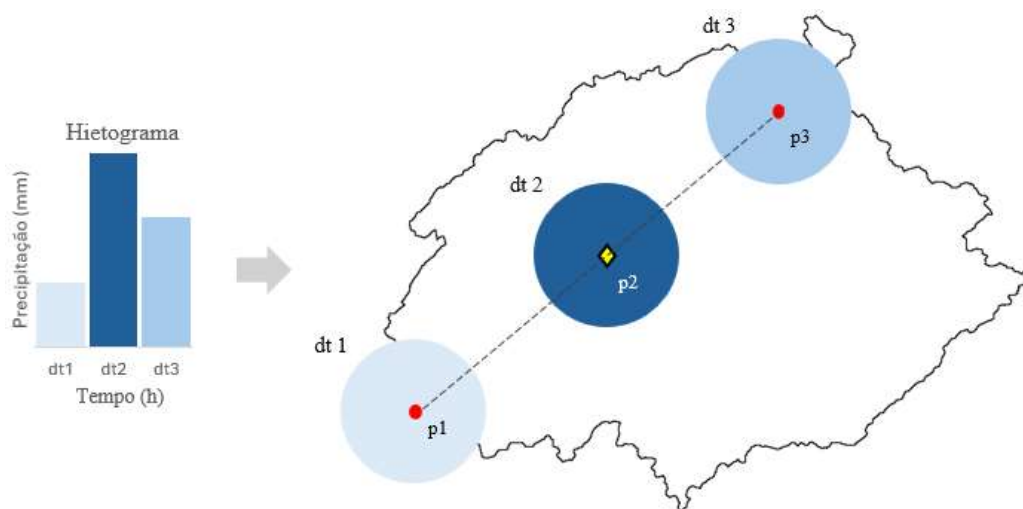
Fonte: adaptado de Gao *et al.*, 2019; representação 3D da célula de chuva foi produzida via Google Gemini, 2026.

Após definição dos campos de intensidade [mm/h], a rotina converte para lâmina precipitada [mm] a partir da multiplicação da intensidade pelo passo de tempo [h] associado a cada célula de intensidade.

Precipitação espacialmente uniforme

A abordagem da chuva média consiste em assumir uma precipitação espacialmente uniforme sobre toda a região de interesse. Nessa configuração, para cada passo de tempo da simulação, o valor da chuva é constante em toda a área e corresponde à lâmina informada pelo usuário. A concepção do valor médio é flexível, podendo representar, por exemplo, uma chuva de projeto associada a um determinado período de retorno, uma precipitação média calculada a partir de métodos como os polígonos de Thiessen etc. Para esse caso, a variabilidade temporal ocorre por meio dos valores de precipitação para cada bloco de chuva enviados para o Gerador de Tormenta. Diferentemente da forma pensada por Gao *et al.* (2019), onde para definir a precipitação invariável no espaço deve-se atribuir o valor α igual a zero (Equação 2). A ilustração dos campos espaço-temporais com precipitação espacialmente constante é apresentada na Figura 13.

Figura 13 - Ilustração dos campos espaço-temporais com precipitação espacialmente uniforme. No esquema, o hietograma representa os dados enviados para o Gerador de Tormentas que retorna a reorganização da precipitação de acordo com a velocidade e direção fornecida.

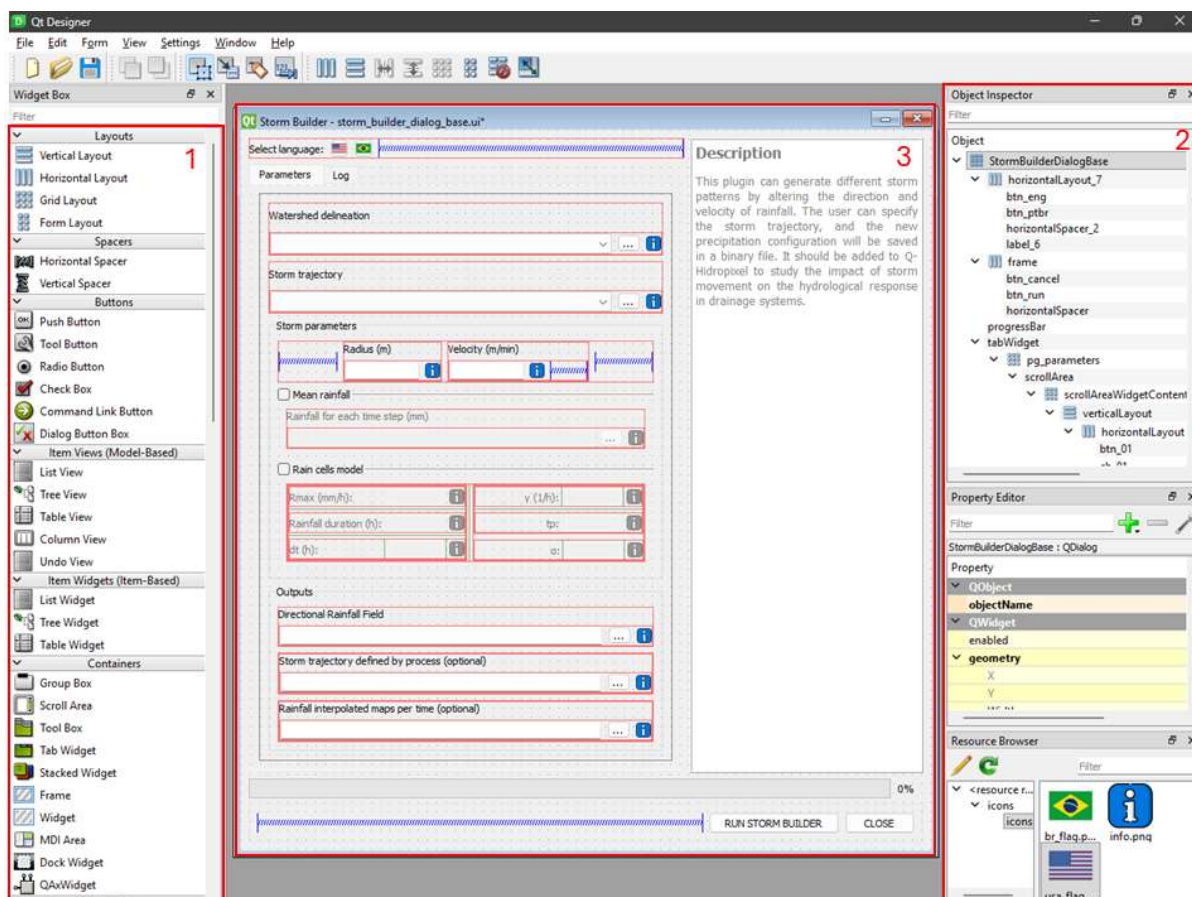


Fonte: autor, 2026.

4.1.2 Interface gráfica e integração ao QGIS

A interface gráfica do gerador de tormentas foi construída por meio do *software Qt Designer* versão 5.15.13, instalado em paralelo com o QGIS. Ele contém um conjunto de funcionalidades como, por exemplo, botões, *Line edits* – armazenam informações digitadas –, *comboxes* – possibilitam a escolha de uma opção em uma lista de valores –, *tool tips* – explicações sobre objetos –, etc. O *Qt Designer* facilita a criação de ambientes gráficos por não demandar nenhum comando para adicionar, posicionar, dimensionar e nomear os objetos. Para isso, se baseia nos pacotes de código *PyQt* e *PySide* (*Qt Group*, 2026). Na Figura 14, é possível visualizar o ambiente gráfico do *Qt Designer* bem como o escopo inicial da interface de usuário do Gerador de Tormentas.

Figura 14 - Ambiente gráfico do software Qt Designer. Na imagem, o retângulo com número 1 mostra o conjunto de elementos (chamados de widget no programa) que podem ser utilizados para executar ações na interface gráfica. O retângulo 2 delimita a aba de propriedade dos widget do número 1. Por fim, o retângulo 3 ilustra a interface gráfica do Gerador de Tormentas em fase de desenvolvimento.



Fonte: autor, 2026.

O primeiro passo para criação da parte visual do Gerador de Tormentas foi aplicar o objeto *QTabWidget* para adição das abas de Parâmetros, onde o usuário poderá inserir os arquivos de entrada; e log, que contém mensagens que descrevem as etapas do processamento. Ademais, para agrupar os textos (*labels*), caixa de texto editável (*line edit*) botões (*buttons*) e as caixas de seleção (*combo box*) foi necessário inserir caixas de agrupamento (*group box*). Como citado na seção 4.1.1 *Algoritmo de geração de campos espaço-temporais de precipitação*, o Gerador de Tormenta considera tanto a precipitação média quanto espacialmente distribuída na bacia hidrográfica, com isso, o usuário deve selecionar apenas uma opção. Nesse caso, ativou-se nas configurações (número 2, Figura 14) do *group box* a opção *checkable* que permite a ativação/desativação de todos os itens contidos. Somado a isso, definiu-se no código fonte da aplicação uma função que desativa o grupo oposto ao selecionado, ou seja, se chuva média for escolhida, não é possível modificar as informações da alternativa

até que a primeira seja desativada. A Tabela 1 contém os *Widgets* utilizados e a função na interface.

Tabela 1 - Ferramentas do software Qt Designer aplicadas no desenvolvimento do Gerador de Tormentas e a função exercida na aplicação.

Objetos Qt Designer	Função na interface gráfica
<i>QTabWidget</i>	Adição das páginas Parâmetros e Log.
<i>QLabel</i>	Inserir textos fixos descritivos e ícone de dica (<i>tool tip</i>) dos elementos.
<i>QTextEdit</i>	Exibição do parágrafo de descrição do Gerador de Tormentas.
<i>QPushButton</i>	Botões programáveis para executar funções como: alterar idioma da interface, iniciar e cancelar processamento.
<i>QToolButton</i>	Inicia formulário de busca de arquivos do <i>Windows</i> .
<i>QgsMapLayerComboBox</i>	Caixa de seleção de arquivos geoespaciais (<i>layers</i>) presentes no QGIS, armazena o diretório dos <i>shapefiles</i> e <i>rasters</i> após aplicação de filtro.
<i>QLineEdit</i>	Caixa de texto editável, recebe os <i>inputs</i> do usuário, ou seja, os parâmetros do Gerador de tormenta. Utilizado também para exibição do diretório dos arquivos de saída.
<i>QGroupBox</i>	Agrupar elementos, categorizando e organizando a interface. Permite ainda ativar e desativar objetos contidos no grupo.
<i>Spacer</i>	Espaço em número de pixel, organização da interface.
<i>QProgressBar</i>	Barra de progresso em porcentagem.

Fonte: autor, 2026.

Após posicionar os itens citados de forma lógica na aba parâmetros, a função Grid foi utilizada para conectá-los de acordo com os grupos apresentados no número 3 da Figura 14. Com esses elementos desenvolveu-se o ambiente gráfico do número 3 da Figura 14.

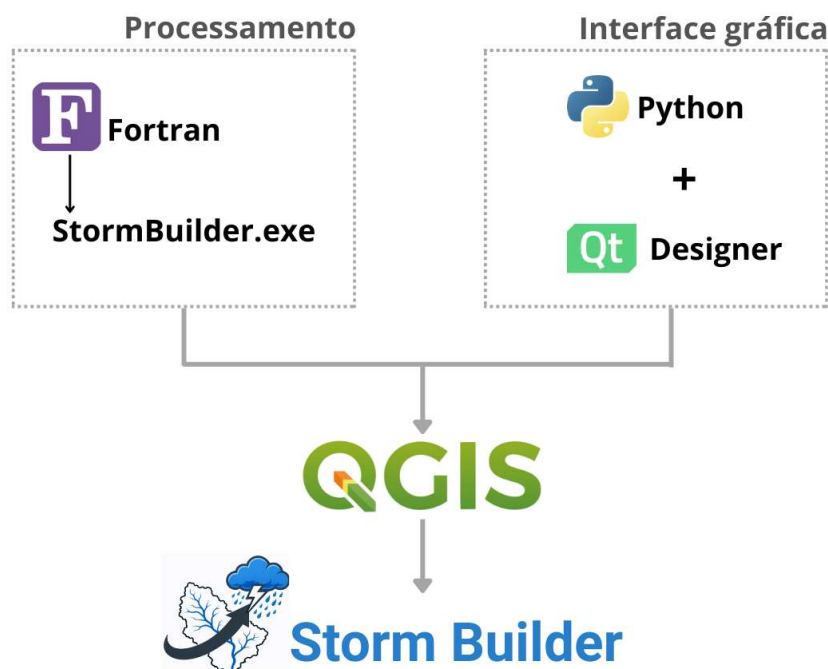
A interface gráfica foi concebida em dois idiomas, inglês e português. O primeiro foi escolhido como o principal por ser considerado uma língua universal, objetivando o compartilhamento da ferramenta no futuro. Porém, foi adicionado um *QPushButton* com ícone da bandeira do Brasil possibilitando a tradução para o português.

A integração do Gerador de Tormentas como um complemento do QGIS se deu por meio do complemento *Plugin Builder*, aplicação que automatiza a criação dos arquivos e pastas necessárias para instalar complementos no SIG, como exemplo: *init.py*, *main.py*, *metadata.txt*, *GUI.ui*, *resource.qrc* etc. (*Plugin Builder Documentation*, 2026). Com esses arquivos, o

Gerador de Tormentas foi adicionado ao QGIS seguindo as instruções: no Menu Barra de Ferramentas do QGIS, selecionou-se “Complementos” e “Gerenciar e Instalar Complementos”, na janela “Complementos” clicou-se na opção “Instalar a partir do ZIP”.

Após instalação do Gerador de Tormentas no SIG, foi realizada a conexão com o executável *Fortran* mencionado na seção 4.1.4 *Algoritmo de geração de campos espaço-temporais de precipitação*. A Figura 15 contém o esquema ilustrativo de como ocorre a conexão entre o *Fortran* e a aplicação em *Python*, realizada de modo *offline* em ambientes distintos. Após compilação das rotinas em *Fortran*, o *script* em *Python* executa o arquivo compilado por meio da biblioteca *subprocess*. Outra possibilidade seria o vínculo direto através do *F2PY*, uma ferramenta que permite construir códigos em Fortran e utilizá-los como bibliotecas no Python (Peterson, 2009). A execução e processamento da chuva inicia-se com o clique no botão Executar presente na interface gráfica.

Figura 15 - Esquema ilustrativo da conexão entre o executável Fortran e o QGIS (interface gráfica criada em Python).



Fonte: autor, 2026.

Assim, toda interação do usuário com o QGIS e com o Gerador de Tormenta (*Storm Builder* – nome dado ao complemento no QGIS) ocorre por meio da aplicação em *Python*, enquanto os cálculos de geração dos campos espaço-temporais de precipitação por meio das rotinas em *Fortran*. Embora o *Fortran* seja uma linguagem antiga, aplicações científicas ainda

são desenvolvidas, principalmente devido à performance computacional dessa linguagem de programação. Por isso, optou-se por esse formato, aplicado também em Guo *et al.* (2022) e Barberena *et al.* (2024).

4.1.3 Funcionalidade de checagem de dados de entrada.

A integração de SIG e modelos hidrológicos com interface gráfica amigável facilita e agiliza sua utilização. No entanto, isso pode induzir o usuário a realizar operações apenas “apertando botões” (termo conhecido por *point-and-click operations*), reduzindo sua criticidade devido à exclusão do embasamento teórico adequado e a conferências mínimas de valores. Assim, isso aumenta a possibilidade de erros durante a operação do modelo (Lima *et al.*, 2025; Raming *et al.*, 2025).

Objetivando minimizar os erros durante a execução do complemento proposto, um conjunto de funções foram criadas para validação dos dados de entrada enviados pelo usuário. Elas foram desenvolvidas em linguagem *Python* (versão 3.9.5) com auxílio de algumas funções do pacote de códigos *Geospatial Data Abstraction Library* (GDAL, versão 3.10.2). Por possuir poucos arquivos de entrada, cinco checagens foram implementadas, todas apresentadas na Tabela 2. Para cada categoria, mensagens autoexplicativas são apresentadas quando há incoerências como, por exemplo, “*Sistema de Referência (SR) incompatível! Por favor, verifique se os arquivos geoespaciais de entrada possuem mesmo SR*”.

Tabela 2 - Checagens de coerência dos dados de entrada.

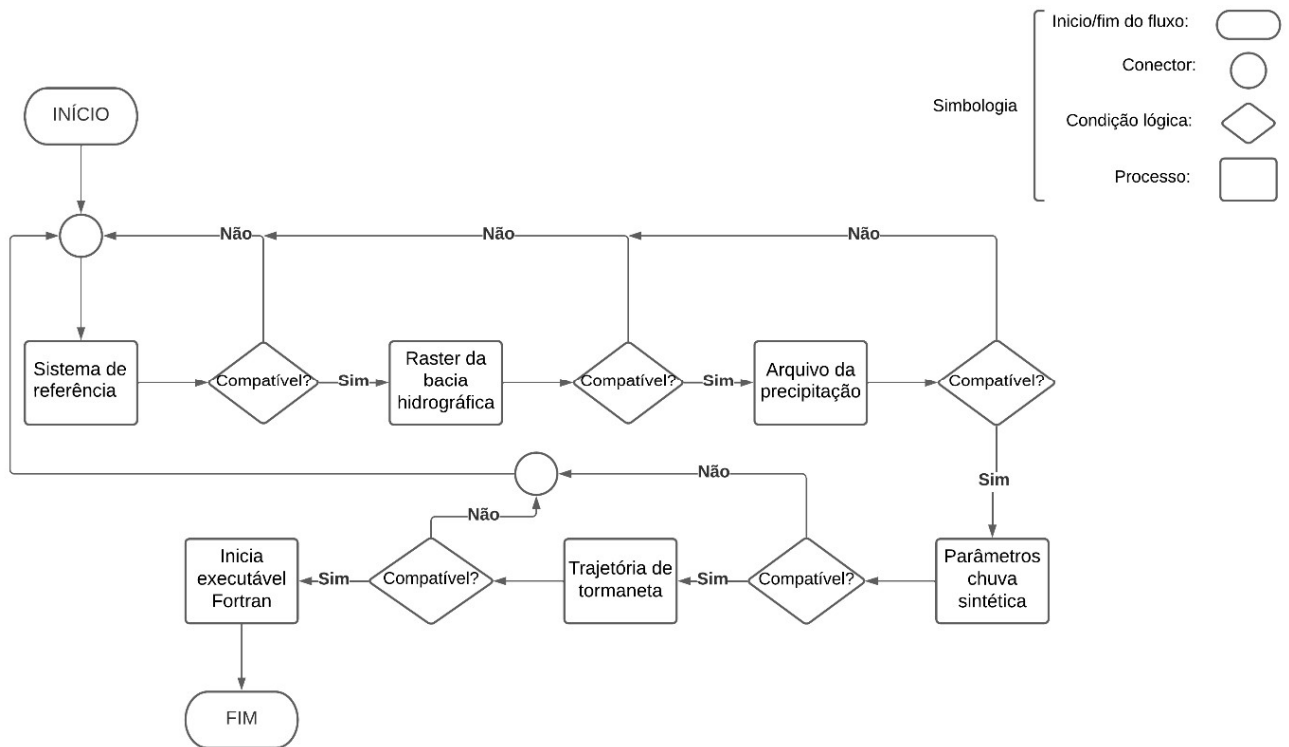
Funções de checagem	Descrição
Sistema de referência	Todos os dados geoespaciais de entrada (camadas vetoriais e matriciais) devem possuir sistema de coordenadas planas, como UTM, por exemplo.
Raster da bacia hidrográfica	Verifica se o arquivo matricial contém apenas: 0 – regiões fora da delimitação da bacia hidrográfica; e 1 – delimitação da bacia hidrográfica.
Arquivo da precipitação	Valores devem ser maiores ou iguais a zero.
Parâmetros de entrada	Verifica se os valores dos parâmetros estão no limite aceito de acordo com a formulação matemática.

Trajectoria da tormenta	Verifica se os pontos enviados obedecem aos seguintes requisitos: 1. Os pontos devem possuir identificadores (IDs) inteiros, positivos, sequenciais e diferentes entre si; 2. Posições devem estar contidas no limite do recorte do raster de delimitação da bacia hidrográfica; 3. Possuir mesmo sistema de coordenadas que o raster da bacia hidrográfica.
-------------------------	---

Fonte: autor, 2026.

Consoante as verificações supracitadas, o fluxo de execução do complemento é ilustrado na Figura 16. Primeiro, as funções são executadas após o usuário clicar no botão “Executar”, com isso é checado se todos os dados geoespaciais estão no mesmo sistema de referência, em sequência se o raster de delimitação da bacia hidrográfica possui apenas os valores 0 e 1, depois o arquivo da precipitação possui valores válidos, então limites dos parâmetros (apenas para a opção do modelo sintético de células), por fim verifica-se a trajetória de tormenta. O executável *Fortran* é iniciado se, e somente se, todas as condições forem satisfeitas.

Figura 16 - Fluxograma de processos das funções de checagem após clique no botão “Executar” do complemento proposto.



Fonte: autor, 2026.

4.2 Área de estudo e dados disponíveis

4.2.1 Localização

A área de estudo dessa pesquisa foi a bacia hidrográfica do alto curso do rio Tapacurá, delimitada até o posto fluviométrico Vitória de Santo Antão (cód. 39170000) e possui área de, aproximadamente, 262 km². Abrange os municípios de Chã Grande, Gravatá, Pombos e Vitória do Santo Antão, contidos na região entre a Zona da Mata e o Agreste do estado de Pernambuco. Destes, apenas Vitória e Pombos possuem unidade administrativa nos limites da bacia hidrográfica, com respectivamente 134.084 e 27.552 habitantes (IBGE, 2022). Na Tabela 3 é possível visualizar a área ocupada na bacia hidrográfica por cada município.

Tabela 3 - Área dos municípios contidos na delimitação da bacia hidrográfica objeto de estudo.

Município	Área ocupada na bacia hidrográfica (km²)	Porcentagem ocupada na bacia hidrográfica (%)
Chã Grande	15,36	5,86
Gravatá	22,27	8,5
Pombos	119,20	45,5
Vitória do Santo Antão	105,17	40,14
Total	262	100

Fonte: autor, 2026.

Essa região foi escolhida devido, principalmente, aos seguintes fatores: histórico de inundação, disponibilidade de dados topográficos digital de alta resolução espacial e existência de dados observados de vazão e precipitação, com intervalo de tempo de minutos.

4.2.2 Caracterização física para a modelagem hidrológica

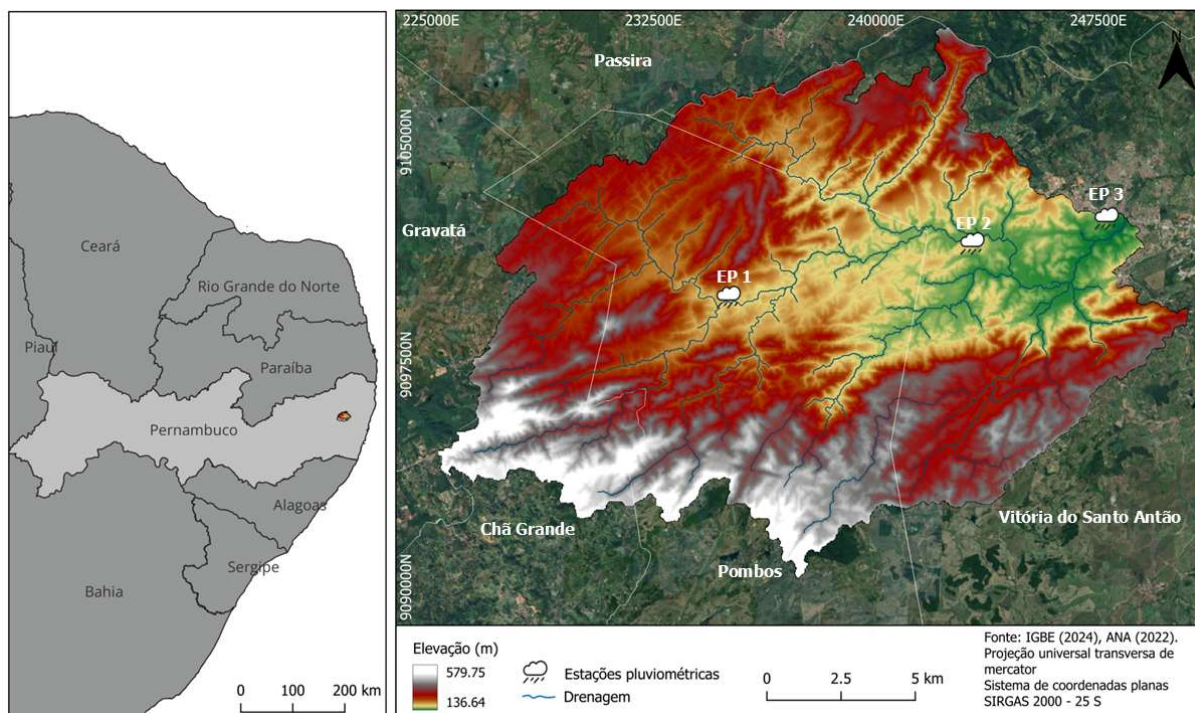
Para modelagem com o Hidropixel, são necessários dados matriciais como MDE, delimitação da bacia hidrográfica, da rede de drenagem, área de drenagem acumulada, uso, cobertura e tipo do solo, do parâmetro CN (Lima *et al.*, 2024).

A topografia da região (Figura 17) foi obtida por meio do Modelo Digital do Terreno de alta resolução disponibilizado pelo projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D; Cirilo *et al.*, 2014). Esse projeto realizou levantamento topográfico via escaneamento com a tecnologia

LiDAR (*Light Detection and Ranging*), disponibilizando gratuitamente, por meio do portal PE3D, MDT com resolução espacial de 1 m. Após obtenção do MDT, o primeiro passo foi a modificação do sistema de referência de coordenadas geográficas para planas. Em seguida, buscando reduzir os custos computacionais, o MDT foi reamostrado para resolução espacial de 30 metros. Para isso, cada pixel de 30 m x 30 m passou a ter o valor médio dos pixels presentes na área ocupada, resultando em um arquivo matricial com 650 linhas e 885 colunas.

A partir do MDT de 30 metros e utilizando o complemento *Whitebox Tool* do QGIS (versão 1.0.9), foi realizada a remoção de depressão via algoritmo PFS (*Priority First Search*) por meio da função *BreachDepressions*, atribuição de direções de fluxo pelo método D8 (Deterministic Eight-Neighbours) aplicado com a função *D8pointer*. Continuando, com base nos caminhos de fluxo definidos consoante as direções de fluxo obtidas no passo anterior, obteve-se a matriz de áreas acumuladas de drenagem através da rotina *D8FlowAccumulation*. Na sequência, aplicou-se o comando *Watershed* considerando como exutório o posto fluviométrico Vitória de Santo Antão (localizado na indicação EP3, na Figura 17). Por fim, para definição da rede de drenagem, foi aplicada reclassificação da área acumulada com o limiar de área de drenagem mínima de 1 km², ou seja, pixels com valor maior ou igual a 1 km² representam canais naturais. A definição do limite se deu a partir do cruzamento entre a matriz de área acumulada de drenagem e imagens de satélite.

Figura 17 - Mapa de localização da área de estudo, com destaque para a hipsometria e drenagem da bacia hidrográfica. As Estações Pluviométricas (EP) representam: EP1 - 261130901A; EP2 - 261640702A; EP3 - 39170000.

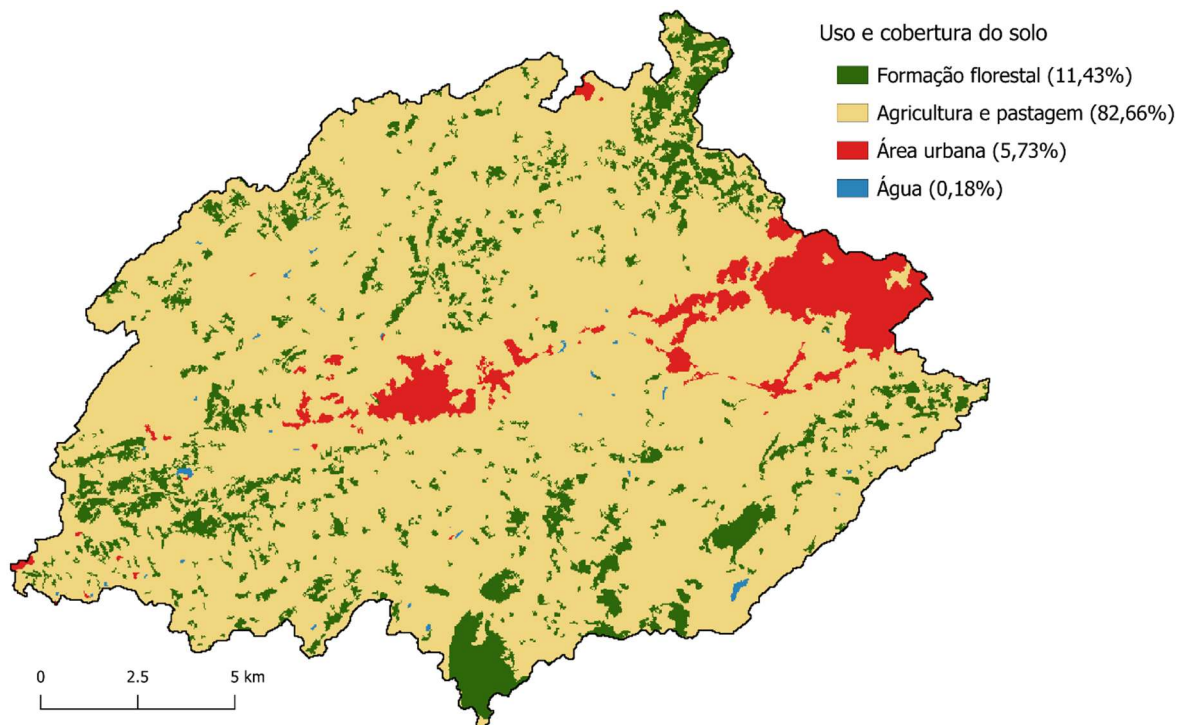


Fonte: autor, 2026.

A nascente do canal principal, o rio Tapacurá, está localizada no município de Chã Grande (PE). A bacia hidrográfica em questão pertence a bacia hidrográfica do rio Capibaribe, que desempenha papel fundamental no abastecimento de água da região metropolitana de Recife (PE).

O mapa de uso e ocupação do solo ilustrado na Figura 18 foi produzido por meio dos dados do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil - MapBiomas (Souza *et al.*, 2020) do ano de 2022. Foram consideradas quatro classes principais, sendo elas: pastagem/agricultura, mata, áreas urbanas, água. Essa etapa é útil para definição de alguns parâmetros dependentes, como o CN, para cálculo da chuva excedente.

Figura 18 - Mapa de uso e cobertura do solo com porcentagem de área ocupada por cada classe.



Fonte: autor, 2026.

Analisando o uso e cobertura, conclui-se que a área de estudo é considerada uma bacia hidrográfica rural, contém regiões de pastagem ou agrícolas, que representam 82,7% da área, já as zonas urbanas representam 5,7% e áreas de mata/floresta ocupam 11,4% (Lima *et al.*, 2025). Com isso, o coeficiente de rugosidade de Manning e o coeficiente k estabelecidos para as classes definidas estão presentes na Tabela 4, para ambos os valores foram baseados em tabelas disponíveis na literatura (NRCS, 2004; Manual de Drenagem de Porto Alegre, 2005; Lima, 2021).

Tabela 4 - Coeficientes de Manning e k utilizados para estimativa do tempo de viagem do escoamento.

Classe de uso e cobertura do solo	Manning	Coeficiente k
Mata	0,4	2,5
Pastagem/Agricultura	0,15	7
Área Urbana	0,013	20
Água	0,01	16

Fonte: autor, 2026.

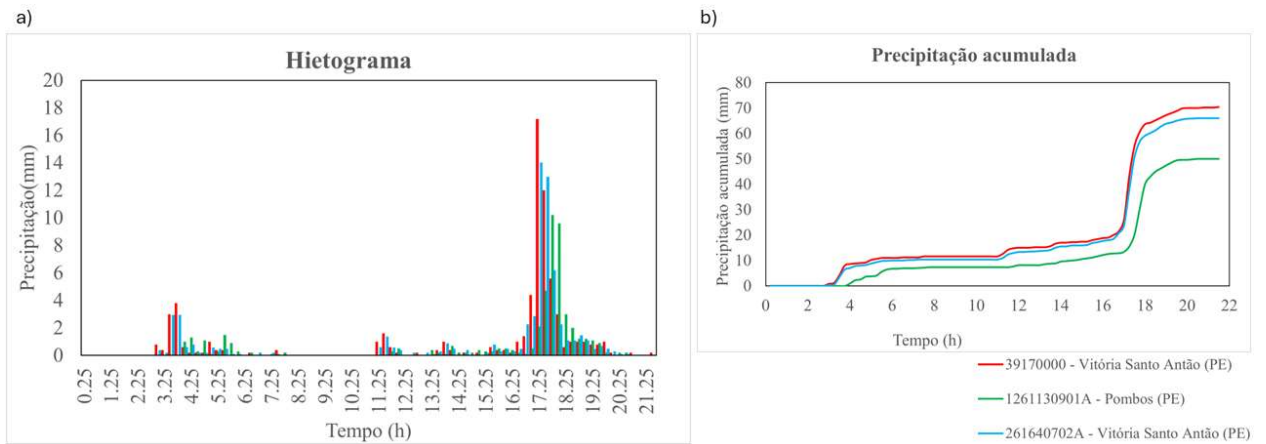
Acerca do tipo de solo, necessário para definição do CN, a bacia do rio Tapacurá (da cabeceira até o deságue no rio Capibaribe) é composta por planaltos rebaixados e possui latossolos profundos e bem drenados em topos planos, argissolos medianamente profundos e bem drenados em vertentes íngremes e gleissolos de várzea em fundos de vales estreitos. O tipo predominante é argilossolos vermelho e amarelo, mas também estão presentes luviosolos, neossolos quartzarênicos e neossolos regolíticos (Duarte *et al.*, 2007; Neto, 2023). Quanto à sub-bacia estudada, observam-se as seguintes categorias: argissolo vermelho-amarelo (51,6%), com ocorrências relevantes também de argissolo amarelo (17,7%), planossolo háplico (11,4%) e neossolo litólico (10,0%), restando menos de 10% da região com outros tipos de solos (ANA, 2017).

4.2.3 Dados hidrológicos

Foi selecionado um evento de precipitação ocorrido em junho de 2022. Os dados foram retirados de três postos de medição representativos (indicados com símbolos de nuvens, na Figura 17), sendo duas estações pluviométricas, Pombos (cód. 261130901A) e Vitória de Santo Antão (cód. 261640702A) e uma estação pluviométrica Vitória de Santo Antão (cód. 39170000).

As estações supracitadas possuem intervalo de tempo de 15 minutos (cód. 39170000) e 10 minutos (cód. 261130901A e 261640702A), com isso, os dados dessas duas estações foram adaptados para intervalos de 15 min (intervalo do dado de vazão). Assim, foi feita a conversão de cada três registros de 10 min (x_1 , x_2 , x_3) em dois registros de 15 min (y_1 , y_2), fazendo $Y_1 = X_1 + X_2/2$ e $Y_2 = X_2/2 + X_3$ (Lima *et al.*, 2025). O hietograma e a precipitação observada acumulada estão presentes, respectivamente, na Figura 19.a e Figura 19.b.

Figura 19 - a) hietograma do evento ocorrido entre 22 e 23 de junho de 2022; e b) precipitação acumulada do evento.



Fonte: autor, 2026.

O evento escolhido ocorreu entre os dias 22 e 23 de junho de 2022, totalizando 21,5 horas com total precipitado variando entre 50 e 70 mm. O pico da precipitação ocorreu entre 12h00 e 21h15 do dia 22/06/2022 resultando na vazão máxima de, aproximadamente, 100 m³/s, ocasionando a inundação do rio Tapacurá no município de Vitória do Santo Antão, apresentada na Figura 20. A imagem foi obtida através de sensoriamento remoto a partir do satélite *PlanetScope*, a captura ocorreu às 09h30 do dia 23/06/2022 (Breckenfeld *et al.*, 2025).

Figura 20 - Mancha de inundação observada no município de Vitória do Santo Antão no dia 23/06/2022, imagem obtida a partir do satélite PlanetScope.



Fonte: autor, 2026.

Nota-se, com base na Figura 20, que o rio Tapacurá cruza a zona urbana do município de Vitória do Santo Antão (PE). Após o exutório da bacia hidrográfica estudada, é possível observar que houve o maior extravasamento da água, ocasionando a inundação das moradias próximas ao rio.

4.3 Simulação Hidrológica com o Hidropixel

4.3.1 Calibração do modelo Hidropixel-DLR

A calibração do Hidropixel-DLR para a área de estudo foi realizada em Breckenfeld *et al.* (2025). Os parâmetros obtidos foram então utilizados para este trabalho para a simulação considerando o efeito da direção de tormenta. Assim, a ferramenta proposta foi utilizada para

gerar o arquivo da precipitação necessário ao Hidropixel para estimativa da chuva excedente. Este tópico contém síntese do procedimento de calibração realizado pelos autores.

Os autores consideraram dois parâmetros durante a calibração, o CN e o β . O primeiro passo foi definir os valores do *curve number*, para isso as categorias de uso, cobertura foram cruzadas com o Grupo Hidrológico (GH), estabelecido com base em cada tipo de solo. O GH indica a capacidade de gerar escoamento do solo, varia de A até D, no qual D representa grupos com baixíssima infiltração, favorecendo o escoamento superficial (NRSC, 2004). Após estabelecidos os GH para as classes de uso e cobertura do solo o valor do CN foi então estimado com base em tabelas presentes em NRSC (2004) e Lima (2021). Feito isso, observou-se que a região estudada contém solos dos grupos B, C e D. Ao grupo hidrológico B foram associados o argissolo vermelho amarelo, o latossolo amarelo e o nossolo regolítico. No grupo C, o argissolo amarelo e o nossolo flúvico. No grupo D são o nossolo litólico, o planossolo háplico, o luvisolo cromico e o gleissolo háplico.

Os valores definidos na literatura consideram o CN para a abstração inicial (λ , porcentagem de perda da precipitação por absorção das plantas, percolação e infiltração) de 20%, porém alguns estudos indicam que há uma maior acurácia ao considerar as perdas igual a 5% (Lima, 2021). Nesse sentido, a conversão do CN se deu consoante aplicação da equação definida em Hawkins *et al.* (2009). A calibração do CN ocorreu segundo procedimento demonstrado em Lima *et al.* (2024), nele, os valores são definidos a partir da condição de umidade antecedente, podendo assumir condição I (solo seco), II (umidade média) ou III (solo saturado). Como as tabelas disponíveis contém CN para condição de umidade II, aplicou-se equação apresentadas em Chow *et al.* (1988) para conversão para I e III.

Em Breckenfeld *et al.* (2025), foram definidas 13 bandas de CN considerando os limites variando da condição I até a III. Com base nas 13 faixas, a subtração entre o valor do CN da condição I e a condição III dividido por 13 resulta a largura da banda, assim se estima os valores do CN para cada faixa. O resultado dessa etapa está presente na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores do Curve Number (CN) para as classes de uso e cobertura do solo dos diferentes grupos hidrológicos.

Grupo hidrológico	Uso do solo	CN020	CN005	CN005_I	CN005_III	Largura da banda
B	Mata	55	40.13	21.97	60.66	3.22
	Pastagem/agricultura	69	57.18	35.94	75.44	3.29
	Urbano	70	58.51	37.20	76.43	3.27

C	Mata	77	68.11	47.29	83.09	2.98
	Pastagem/agricultura	79	70.95	50.64	84.89	2.85
	Urbano	84	78.18	60.08	89.18	2.43
D	Mata	85	79.64	62.16	90.00	2.32
	Pastagem/agricultura	90	86.94	73.66	93.87	1.68
	Urbano	92	89.83	78.76	95.31	1.38
-	Água	100	100	100	100	-

Fonte: autor, 2026.

Os valores ótimos do CN e do β (varia de 0 até 1) se deu por tentativa e erro objetivando o ajuste visual de hidrogramas e priorizando a vazão de pico. Assim, após calibração do parâmetro β , o Hidropixel-DLR foi executado 13 vezes. Breckenfeld *et al.* (2025) simularam um evento de chuva ocorridos na bacia hidrográfica do alto Tapacurá em junho/2022 com total acumulado variando entre 50 e 70 mm em 21,5 horas. Como resultado, a combinação do β igual a 0,45, o evento de junho/2022 teve melhor resultado com a faixa 12 (condição de umidade III). Os valores de CN da banda 12 são apresentados na Tabela 6.

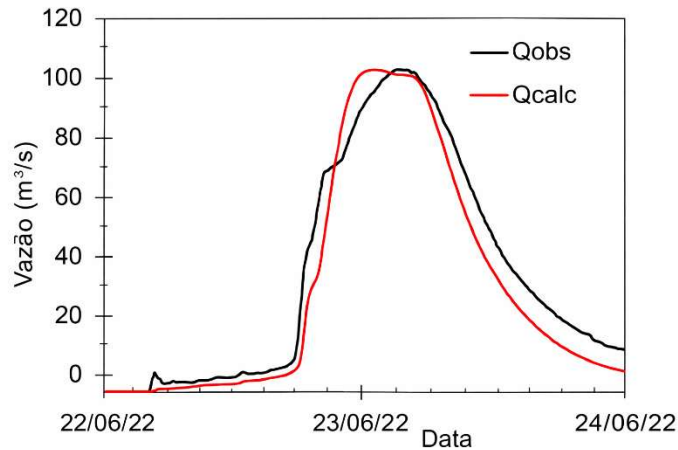
Tabela 6 - Valores do parâmetro curve number após calibração do modelo Hidropixel-DLR.

Grupo hidrológico	Uso do solo	CN faixa 12
B	Mata	57,4
	Pastagem/agricultura	72,1
	Urbano	73,2
C	Mata	80,1
	Pastagem/agricultura	82,0
	Urbano	86,8
D	Mata	87,7
	Pastagem/agricultura	92,2
	Urbano	93,9
-	Água	100,0

Fonte: autor, 2026.

A Figura 21 contém os hidrogramas gerados através da simulação hidrológica com o Hidropixel-DLR e os parâmetros citados. As vazões observadas foram retiradas da estação fluviométrica Vitória de Santo Antão (cód. 39170000).

Figura 21 - Hidrogramas observados e calculados através do Hidropixel para o evento de junho/2022 na bacia hidrográfica do rio Tapacurá.



Fonte: Breckenfeld *et al.*, 2025.

4.3.2 Cenários simulados

Para testar as funcionalidades do Gerador de Tormenta e avaliar os efeitos na simulação hidrológica com o Hidropixel-DLR, dois cenários foram estudados, sendo eles: i) precipitação com campos espaço-temporais de intensidade uniforme e constante; ii) precipitação com campos espaço-temporais de intensidade variável no tempo e no espaço. Destaca-se que fugiu ao escopo desse trabalho caracterizar como são os sistemas precipitantes na região, ou como são as trajetórias típicas de tormenta sobre a bacia hidrográfica de estudo.

Para todas as simulações desse estudo a velocidade foi constante e igual a 1,22 km/h (20.32 m/min – unidade aceita no Gerador de Tormentas). Essa velocidade é a necessária para coincidir a duração do evento com a travessia da bacia consoante as trajetórias escolhidas (Equação 3).

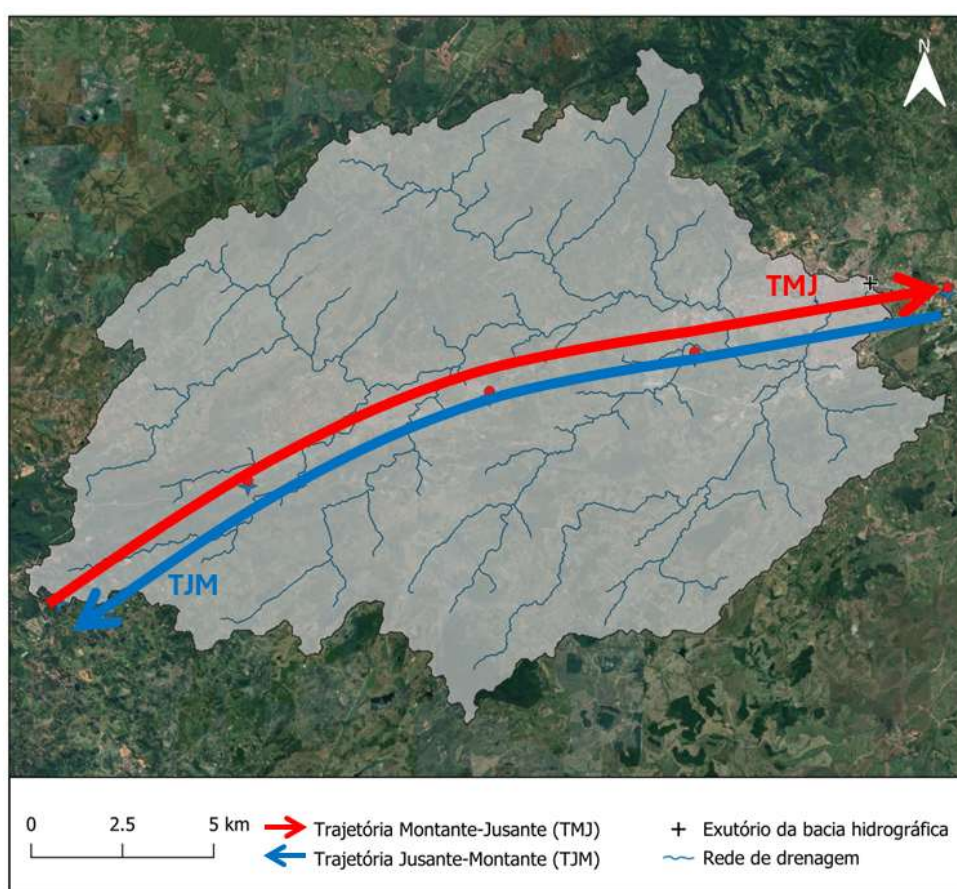
$$vel = \frac{L_{traj}}{Rain_{dur}} \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde vel é a velocidade [km/h], L_{traj} é o comprimento da trajetória [km] e $Rain_{dur}$ é a duração do evento [h].

Trajetoórias de tormenta estabelecidas

Duas trajetórias foram analisadas nesse estudo, na primeira a precipitação segue o fluxo do rio principal de montante (cabeceira) para jusante (exutório) - TMJ; na segunda, o oposto, do exutório (jusante) para a cabeceira (montante) - TJM. Essas trajetórias foram consideradas também em de Lima *et al.* (2002), Fang *et al.* (2019) e Gao *et al.* (2019). As trajetórias definidas estão dispostas na Figura 22.

Figura 22 - Trajetórias de tormenta escolhidas para geração dos campos espaço-temporais de precipitação a partir do Gerador de Tormentas.



Fonte: autor, 2026

Precipitação com campos espaço-temporais de intensidade uniforme e constante

Nesse caso, as células de chuva possuem valor constante no espaço e no tempo. A precipitação média foi definida através da aplicação do método dos polígonos de Thiessen. Posteriormente, definiu-se a precipitação máxima observada para um intervalo de tempo de 15

minutos, resultando uma lâmina de água de 12,1 mm. Este valor foi considerado invariável durante a duração do evento.

Adicionalmente, definiu-se um raio de 4000 m para o campo espacial de precipitação. Essa escolha se deu baseada em análises do estudo de Gao *et al.* (2019). Os autores definiram o diâmetro da tormenta com base em imagens de radar presentes na área de estudo. Porém, esses dados não estavam disponíveis para esse trabalho e avaliá-los fugia ao escopo do estudo. Assim, o raio escolhido corresponde a um círculo que ocupa aproximadamente 20% da área da bacia hidrográfica, relação vista em Gao *et al.* (2019) como valor padrão (5 km).

Precipitação com campos espaço-temporais de intensidade variável no espaço e no tempo

Para esse caso, foi utilizado o método baseado em Gao *et al.* (2019), intitulado nessa pesquisa como modelo de chuva sintética. Os parâmetros utilizados foram baseados no evento ocorrido entre 22 e 23/06/2022 na região de interesse, sendo eles: duração, passo de tempo e intensidade máxima. O coeficiente de variação temporal γ (Equação 1) foi definido de forma a garantir início da precipitação nos primeiros instantes do evento. O t_p (Equação 1) escolhido implica a ocorrência da intensidade máxima do evento na metade da duração do evento. Por fim, o parâmetro de distribuição espacial α foi definido com base no estudo de Gao *et al.* (2019). Os valores utilizados para criação das chuvas sintéticas estão agrupados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados no Gerador de Tormentas para criação de chuvas sintéticas.

Parâmetro	Valor
Duração (h) do evento - D	21,5
Passo de tempo (h) - dt	0,25
Intensidade máxima (mm/h) - Rmax	48,61
Coef. variação temporal (h^{-1}) - γ	0,13
Posição da intensidade máxima - t_p	0,5
Coef. distribuição espacial - α	3

Fonte: autor, 2026.

Para esse cenário, uma rodada adicional foi realizada, aumentado o raio para 8000 m, objetivando avaliar as consequências da área de influência dos campos espaço-temporais de precipitação.

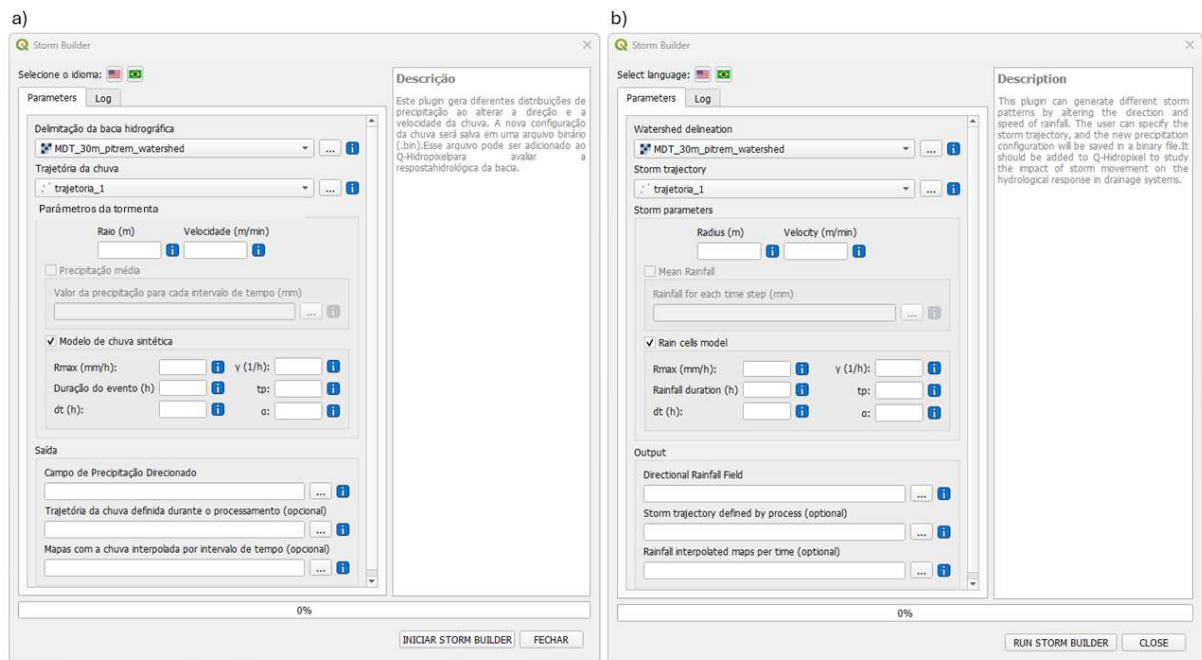
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Interface gráfica como um complemento no QGIS

A Figura 23 apresenta a interface gráfica do Gerador de Tormentas implementada no QGIS como um complemento. O idioma principal escolhido foi o inglês (Figura 23.b), sendo possível alterar a partir dos pontos com ícones das bandeiras dos países no canto superior esquerdo da interface. Os dois primeiros campos (Delimitação da bacia hidrográfica e Trajetória da chuva, Figura 23.a) demonstram a conexão do complemento com o QGIS, sendo possível selecionar camadas inseridas no projeto do SIG. Alterações feitas são automaticamente carregadas no Gerador de Tormentas, facilitando o processamento dos arquivos de entrada e a geração das chuvas sintéticas.

A marcação “chuva sintética” (Figura 23.a) e “*rain cells model*” (Figura 23.b) representam a metodologia escolhida para concepção da precipitação sintética através do Gerador de Tormentas. Ela exemplifica a obrigatoriedade de escolher apenas uma metodologia das descritas na seção 4.1.1 *Algoritmo de geração de campos espaço-temporais de precipitação*.

Figura 23 - Interface gráfica do Gerador de Tormentas integrado ao QGIS como um complemento. a) interface em português; b) interface em língua inglesa.



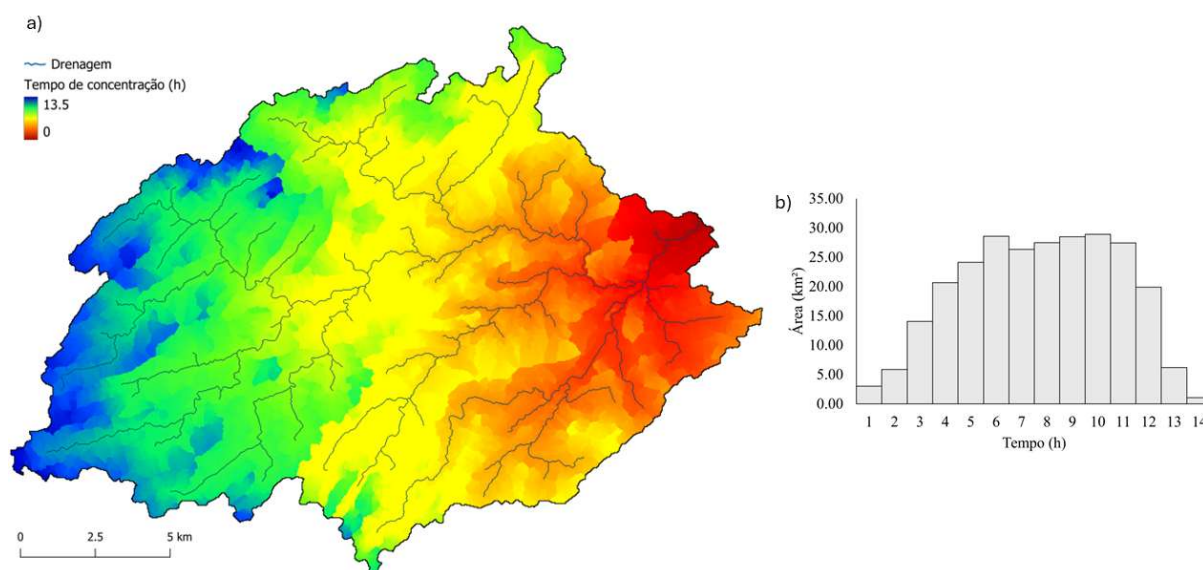
Fonte: autor, 2026.

A integração do Gerador de Tormentas com o QGIS permitiu a utilização das funções disponíveis no SIG. A possibilidade de gerar os arquivos de entrada, simular e visualizar os resultados no mesmo ambiente facilita a aplicação do Gerador de Tormentas.

5.2 Tempo de viagem do escoamento

O tempo de viagem do escoamento de cada pixel é apresentado na Figura 24.a. Observa-se que a bacia hidrográfica possui tempo de concentração próximo a 13,5 horas. A maioria dos pixels estão contidos na faixa de 6 a 11 horas, como ilustra o histograma tempo-área da Figura 24.b, sendo a maior concentração em torno de 10 horas (11,03%). A região da cabeceira, valores entre 13 e 14 horas, ocupam cerca de 2,75% da área da bacia hidrográfica, facilmente vistos na Figura 24.a (azul escuro), estão dispostos à sudoeste da imagem. Já a zona do exutório, com tempo de viagem do escoamento menor que 1 hora, representa 1,15% da área da bacia.

Figura 24 - Mapa do tempo de viagem do escoamento superficial (a) até o exutório e histograma Tempo-Área (b).



Fonte: autor, 2026.

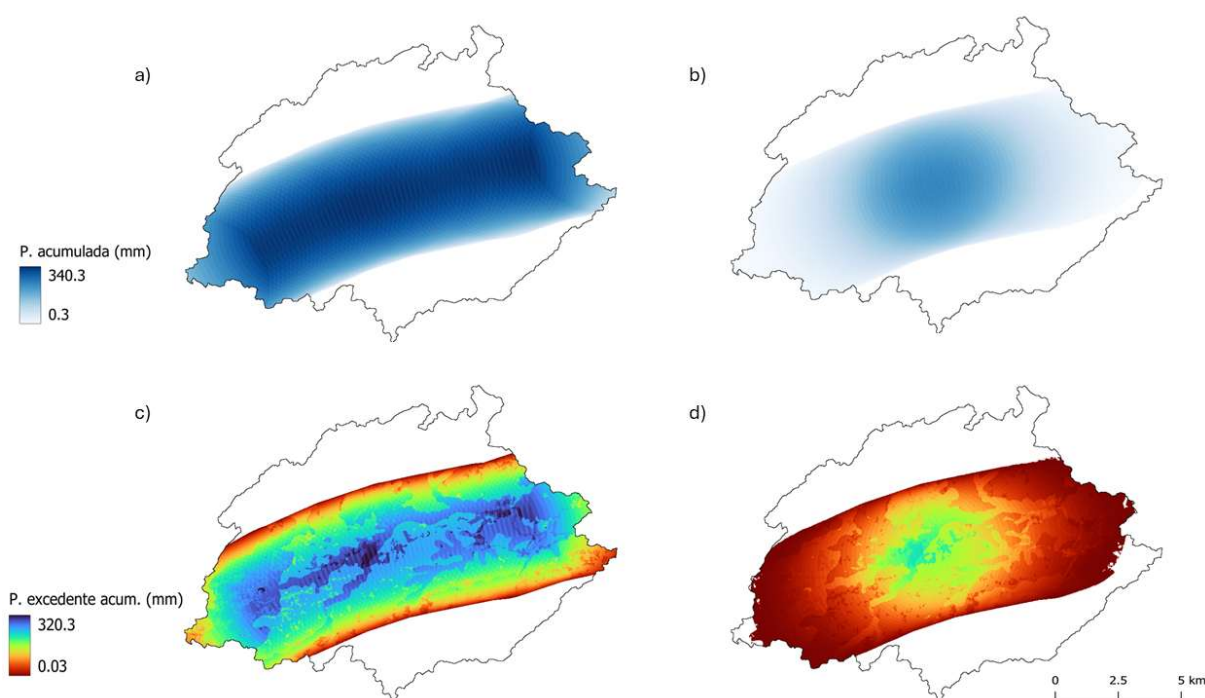
5.3 Geração de escoamento superficial

Na Figura 25 são apresentados os mapas de precipitação acumulada (Figura 25.a e Figura 25.b) e chuva excedente acumulada (Figura 25.c e Figura 25.d). A precipitação acumulada durante o evento possui lâmina total de, aproximadamente, 340 mm. A trajetória apresentada na Figura 25 é de montante para jusante. A Figura 25.a ilustra o cenário de chuva

com intensidade uniforme e constante no tempo. É possível visualizar as linhas de intersecção dos campos de precipitação durante sua extensão. Percebe-se também que o total acumulado está concentrado no centro da trajetória, já os valores menores estão contidos nas bordas. Isso se dá devido sobreposição maior dos círculos ocorrer próximo aos centros. Por outro lado, a Figura 25.b contém a chuva acumulada do cenário espaço temporal distribuído. É notória a concentração máxima no centro da trajetória, fato esperado devido a escolha da posição da intensidade máxima ($tp = 0,5$) na metade do caminho, ocasionando a depleção da precipitação à medida que se aproxima das bordas.

A precipitação efetiva acumulada (Figura 25.c e Figura 25.d) possui mesmo comportamento, variando de 0 a 320 mm. A escolha da trajetória dos campos espaço-temporais de precipitação condiciona a interação da chuva com a superfície da bacia hidrográfica. Observa-se na Figura 25.c que os valores máximos ocupam a bacia da cabeceira ao exutório. Dessa forma, espera-se que o volume escoado seja maior. Por outro lado, no cenário distribuído (Figura 25.d) o efeito que governa o resultado apresentado é o padrão espacial da chuva sintética ocorrida (Figura 25.b).

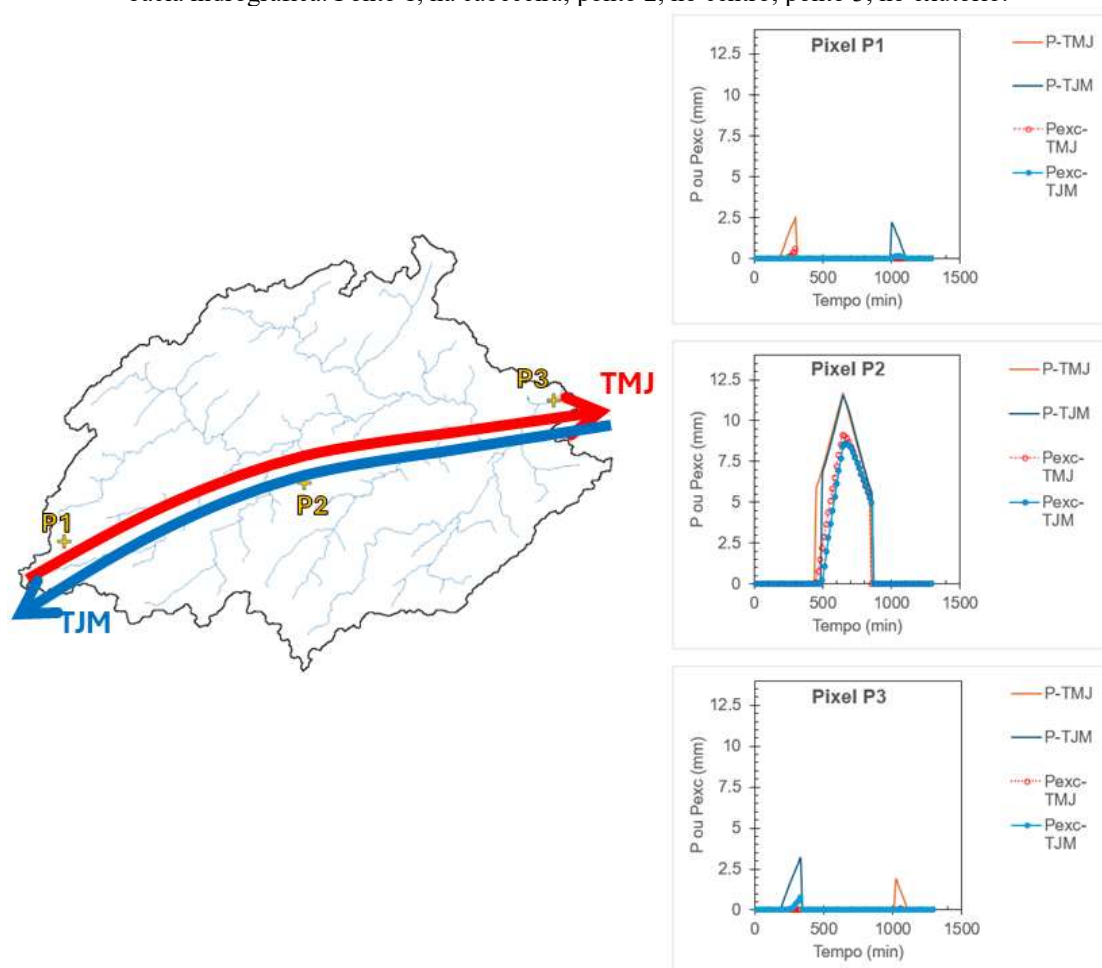
Figura 25 – Mapas da precipitação acumulada e precipitação excedente acumulada durante a duração do evento para direção seguindo a rio Tapacurá. a) precipitação acumulada do cenário uniforme; b) precipitação acumulada para o caso distribuído; c) precipitação excedente acumulada do cenário uniforme; d) precipitação excedente acumulada para o caso distribuído.



Fonte: autor, 2026.

Somado a isso, a Figura 26 apresenta o hietograma da precipitação e da chuva efetiva de três pixels da bacia hidrográfica para as trajetórias TMJ e TJM. Eles foram posicionados na cabeceira (pixel 1), no centro (pixel 2) e no exutório (pixel 3). Percebe-se que para os pixels extremos ocorre a alternância entre as respostas. Para o pixel 1, a chuva de montante ocorre nos primeiros momentos do evento, enquanto a de jusante, próximo ao fim. O oposto é visto para o pixel 3, porém, a precipitação inicial foi maior, haja vista o crescimento ascendente da chuva. Na trajetória TJM, o centro ficou mais próximo do pixel 3, ocasionando essa resposta. Para o ponto 2, nos dois casos observa-se o mesmo padrão, a diferença entre o início da precipitação se dá pelo mesmo motivo, o deslocamento do centro da tormenta para a esquerda (TMJ) e para a direita (TJM).

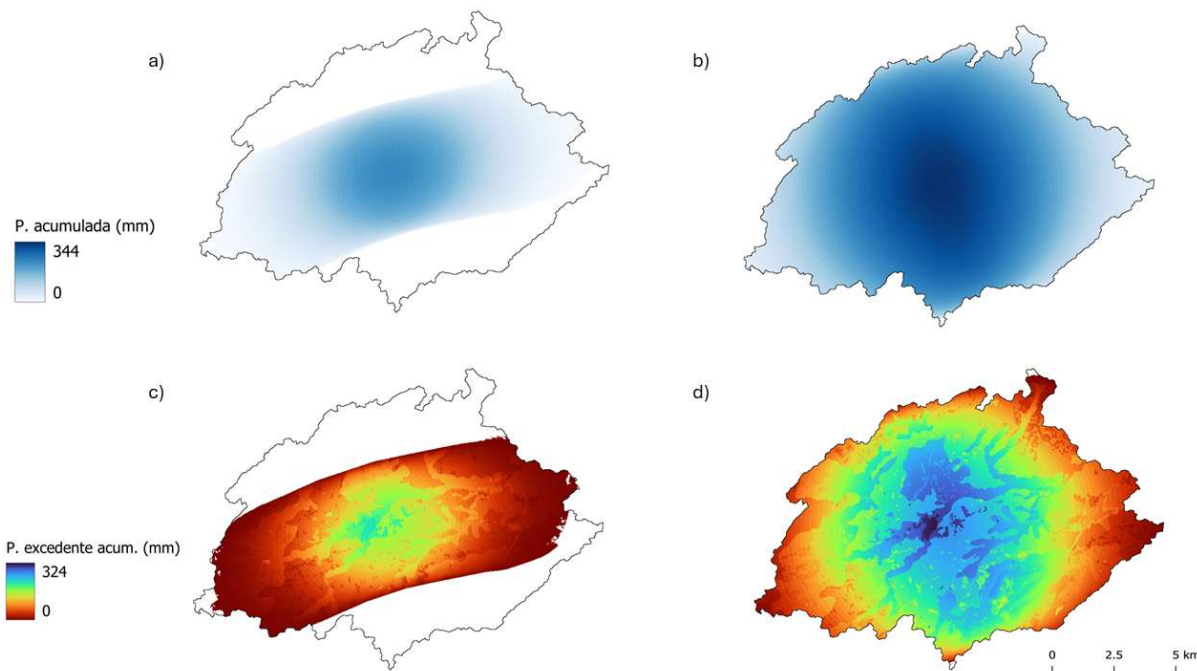
Figura 26 - Hietograma de precipitação versus hietograma de chuva efetiva para pixels em diferentes zonas da bacia hidrográfica. Ponto 1, na cabeceira; ponto 2, no centro; ponto 3, no exutório.



Fonte: autor, 2026.

Para o raio de tormenta de 8 km, o total acumulado foi de, aproximadamente, 344 mm. A chuva excedente total foi próxima à 324 mm. Os mapas contendo a precipitação acumulada e a chuva efetiva acumulada estão apresentados na Figura 27.

Figura 27 - Mapa de precipitação acumulada e precipitação efetiva acumulada para os raios de tormenta de 4 e 8 km. a) distribuição da precipitação acumulada para a tormenta de 4 km; b) precipitação acumulada para o raio de tormenta de 8 km; c) precipitação excedente acumulada para a tormenta com raio de 4 km; d) precipitação excedente acumulada para a tormenta com raio de 8 km.



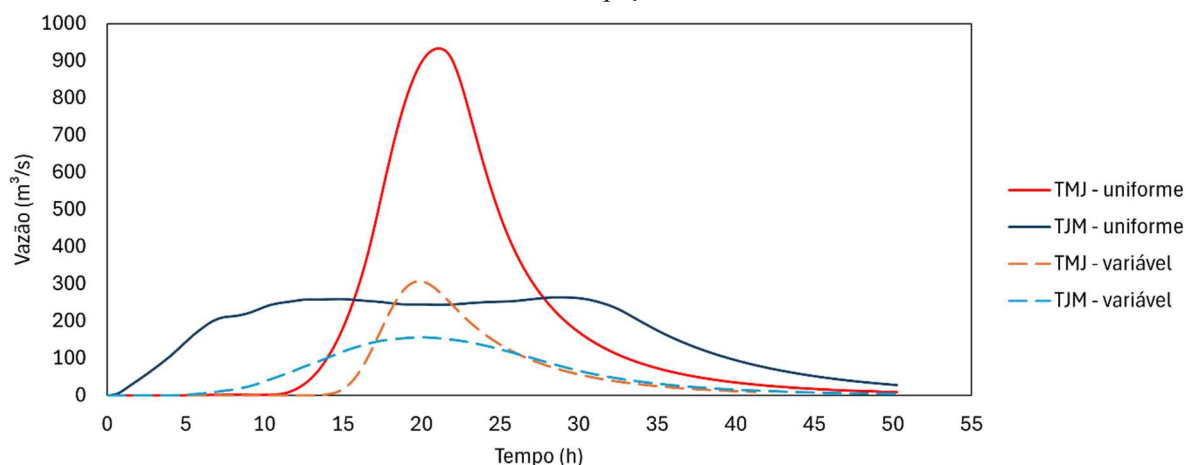
Fonte: autor, 2026.

5.4 Hidrogramas resultantes

5.4.1 Precipitação uniforme *versus* variável

Os hidrogramas da simulação considerando chuva uniforme (linhas contínuas) e variável (linhas tracejadas) para as duas trajetórias simulados com o Hidropixel-DLR são apresentados na Figura 28.

Figura 28 - Hidrogramas para as trajetórias TMJ e TJM das simulações com chuva uniforme e variável no tempo e no espaço.



Fonte: autor, 2026.

Na trajetória uniforme, os campos de chuva com intensidade espacialmente uniforme e igual a 48,61 mm se deslocam no domínio da trajetória (ver Figura 22). A linha contínua vermelha (TMJ) apresenta o pico de vazão mais elevado e o menor tempo de base. Esse fenômeno ocorre porque a tormenta segue a onda de escoamento que ela mesma gera (Singh, 1998; de Lima *et al.*, 2002). À medida que a chuva cai nas cabeceiras e começa a seguir o fluxo da rede de drenagem, a tormenta se move junto com essa massa de água, adicionando continuamente novo volume à frente de onda. O resultado é um efeito de acumulação hidrodinâmica que reduz o tempo de resposta e eleva a vazão de pico no exutório, como observado em Gao *et al.* (2019). A trajetória TMJ, com vazão máxima de 933,0 m³/s em 21 horas, foi, portanto, muito mais crítica que a outra.

A trajetória com sentido oposto (TJM), linha contínua azul (Figura 28), exibe um comportamento totalmente oposto, o hidrograma achatado, com pico significativamente menor (263,86 m³/s em 28,5h) e uma base mais alongada. Neste cenário, o aporte inicial ocorre perto do exutório com tempo de escoamento reduzido, por isso a vazão inicia antes. Enquanto a chuva que cai posteriormente, quando a tormenta atinge as cabeceiras, leva muito mais tempo para percorrer a bacia. Como a tormenta e o fluxo da água viajam em sentidos opostos, o volume total precipitado é distribuído ao longo de um intervalo de tempo muito maior, evitando a superposição das contribuições de diferentes partes da bacia e resultando em uma resposta hidrológica mais amortecida. Esse comportamento foi também observado nas simulações realizadas por Fang *et al.* (2019) e Gao *et al.* (2019). Ao comparar os dois casos quantitativamente, percebe-se que a vazão máxima de TMJ é cerca de 3,5 vezes superior à de

TJM. Além disso, a resposta hidrológica de TJM levou cerca de 7 horas a mais para atingir o pico, evidenciando a influência das trajetórias de tormentas na propagação do escoamento.

Ao considerar a variabilidade espacial e temporal (linhas tracejadas), a estrutura interna dos campos de precipitação não é mais uniforme, a intensidade evolui no tempo e no espaço. Observa-se que a variabilidade tende a produzir respostas hidrológicas distintas. A magnitude delas depende de como os núcleos de maior intensidade se alinham com a rede de drenagem. Se o núcleo da tormenta atingir áreas específicas, como áreas urbanas (maior impermeabilidade do solo), enquanto se move para jusante (TMJ), o reforço do pico pode ser maximizado. O cenário distribuído gerou o menor tempo de pico das simulações realizadas, cerca de 19,75 h. Porém, a vazão de pico desse caso foi 3 vezes menor ($307 \text{ m}^3/\text{s}$) que a do cenário constante.

A trajetória TJM considerando a variabilidade espaço-temporal da precipitação tende a causar hidrogramas com picos bem identificados, devido a variação temporal da intensidade da precipitação. O efeito de dispersão temporal causado pela direção da tempestade continua sendo o fator dominante de amortecimento (Gao *et al.*, 2019). A variabilidade espacial e temporal, nesse caso, tem peso maior na definição da forma do hidrograma do que na alteração da sua magnitude, uma vez que o sentido TJM impede a convergência e superposição dos fluxos ocorridos na TMJ. Ou seja, o viés direcional (*directional bias*, Singh, 1998) permanece preservado. Esse cenário resultou na menor vazão de pico, cerca de $156 \text{ m}^3/\text{s}$ (30% menor que o caso uniforme) em 20 horas.

Por fim, comparando os dois resultados, uniforme (linhas contínuas) *versus* a tormenta dinâmica (linhas tracejadas), fica evidente a complexidade dos sistemas hidrológicos da bacia hidrográfica e a importância de considerar a mudança espaço-temporal da precipitação na modelagem. Como destacado por Fang *et al.* (2019), a simplificação da chuva como algo espacialmente homogêneo pode levar a erros na simulação da vazão. A Tabela 8 contém os dados quantitativos dos hidrogramas da Figura 28.

Tabela 8 - Dados quantitativos dos hidrogramas para as trajetórias TMJ e TJM das simulações uniformes e espaço-temporalmente variáveis.

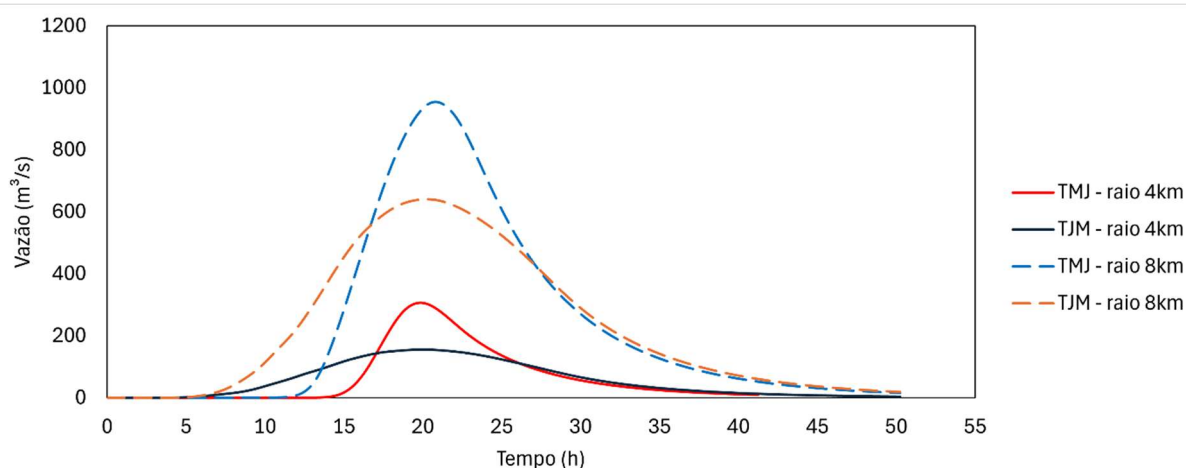
Tipo	Trajetoária	Vazão de Pico (m^3/s)	Tempo de pico (h)	Volume total (hm^3)
Estacionário	TMJ	933,00	21,00	30,37
	TJM	263,87	28,75	28,23
Variável	TMJ	307,04	19,75	9,02
	TJM	156,43	20,00	9,07

Fonte: autor, 2026.

5.4.2 Variação do raio da tormenta

A Figura 29 apresenta os hidrogramas para as trajetórias TMJ e TJM considerando o raio de 4 km (linha contínua, rodada padrão) e de 8 km (linha tracejada).

Figura 29 - Hidrogramas para as trajetórias TMJ e TJM das simulações com raios de 4 e 8 quilômetros.



Fonte: autor, 2026.

O aumento do raio da tormenta alterou consideravelmente a dinâmica da resposta hidrológica. Ao dobrar o raio, a área de cobertura da chuva quadruplicou, o que resultou em um aumento no volume total de água precipitado, gerando um volume escoado cerca de 4 vezes maior que a rodada com raio de 4km. Isso implicou o aumento significativo na vazão de pico, de 307 m³/s para 954 m³/s para TMJ e de 153 m³/s para 640 m³/s para TJM. Percebe-se que a forma do hidrograma TJM é distinta para os dois raios, esse efeito foi discutido em Nicótina *et al.* (2008) e Singh (1998), os autores citam que quanto maior a tormenta em relação ao tamanho da bacia, menor tende a ser o viés direcional. Informação observada ao comparar a diferença entre as vazões de pico das simulações com raio de 4 km e 8 km. Enquanto para a primeira, o pico de TMJ é 100% maior (o dobro) do que o pico de TJM; para o raio de 8 km a diferença caiu para cerca de 49%.

Isso ocorre porque uma tormenta maior ocupa uma porção maior da bacia hidrográfica simultaneamente. Assim, quando o raio é grande o suficiente, a chuva começa a se comportar de forma similar a um evento estacionário de larga escala, onde a bacia inteira recebe precipitação ao mesmo tempo por um período mais longo, diminuindo o viés direcional. A Tabela 9 apresenta os dados quantitativos dos hidrogramas da Figura 29.

Tabela 9 - Dados quantitativos dos hidrogramas para as trajetórias TMJ e TJM considerando os raios de 4 e 8 quilômetros.

Raio (km)	Trajetoária	Vazão de Pico (m³/s)	Tempo de pico (h)	Volume total (hm³)
4	TMJ	307,04	19,75	9,02
	TJM	156,43	20,00	9,07
8	TMJ	954,42	20,75	37,52
	TJM	640,27	20,25	36,90

Fonte: autor, 2026.

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

A ferramenta computacional desenvolvida nesse estudo se mostrou capaz de integrar a trajetória de tormentas à modelagem hidrológica com o modelo Hidropixel. As simulações hidrológicas realizadas na bacia do alto curso do rio Tapacurá confirmaram a condição determinante da dinâmica das chuvas na formação de cheias. Observou-se que a trajetória da tormenta é, de fato, um fator controlador da magnitude do pico de vazão, evidenciando o fenômeno de viés direcional. A trajetória de montante para jusante (TMJ) mostrou-se mais crítica, gerando picos de vazão significativamente superior à trajetória oposta (TJM). No cenário de precipitação constante, a vazão máxima para TMJ foi cerca de 3,5 vezes superior à de TJM, reforçando a necessidade de considerar a direção do movimento nos sistemas de alerta e planos de gestão de desastres.

A análise de sensibilidade quanto ao tamanho da célula de chuva revelou que o raio da tormenta altera drasticamente a resposta da bacia. O aumento do raio de 4 km para 8 km não apenas elevou os picos de vazão devido ao maior volume precipitado, mas também reduziu o efeito relativo do movimento. Entendendo-se que, quanto maior a dimensão da tormenta em relação à área da bacia, menor é o impacto da sua trajetória, uma vez que a precipitação passa a ocorrer de forma quase simultânea em todo o domínio, assemelhando-se a um evento estacionário de larga escala.

Por fim, a ferramenta desenvolvida representa um avanço para o suporte à decisão na gestão de recursos hídricos, permitindo a exploração de cenários diversos de precipitação. Os resultados demonstraram a importância da incorporação da variabilidade espaço-temporal da precipitação na modelagem chuva-vazão, especialmente em bacias com tempos de resposta rápidos e histórico de eventos extremos, como a do rio Tapacurá.

6.2 Recomendações

- Avaliar o efeito das trajetórias de tormenta no mapeamento de áreas suscetíveis a inundação.
- Estudar o efeito dos parâmetros de variação espacial e temporal na vazão final.
- Testar o gerador de tormentas com outras velocidades para análise dos efeitos.
- Simular cenários com outras trajetórias para o mapeamento das direções mais críticas.
- Utilizar outro modelo para propagação da onda de cheia para comparar as respostas hidrológicas.
- Realizar simulação em bacia hidrográfica urbanizada para estudo da influência do uso e cobertura do solo.
- Estudar os padrões espaço-temporais de precipitação a partir de dados de radar para conceber tormentas sintéticas mais realistas ao padrão de chuvas da região.

7. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Olga Barbosa. *[Trabalho acadêmico]*. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife. [S.l.].

BARBERENA, Iñigo et al. Introducing QAnnAGNPS – A QGIS plugin to facilitate the use of AnnAGNPS. *Environmental Modelling & Software*, v. 174, p. 105968, 2024. DOI: 10.1016/j.envsoft.2024.105968.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. *Atlas Digital de Desastres no Brasil*. 2024. Disponível em: <https://atlasdigital.mdr.gov.br/>. Acesso em: 4 jan. 2026.

BRASIL EM TRANSFORMAÇÃO: o impacto da crise climática. *Caderno Técnico II – Temporadas das águas: o aumento das chuvas extremas*. Santos: UNIFESP; UNESCO; MCTI; FGB, [s.d.]. 2025.

BRECKENFELD, Karolyne Aquino Alexandre et al. Sistema simplificado de previsão de áreas inundáveis em tempo real a partir de modelagem hidrológica, MDE e curvas-chave sintéticas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 26., 2025. *Anais*. Porto Alegre: ABRHidro, 2025.

CHELIZ, Pedro Michelutti et al. O papel do meio físico e relevo na ocupação humana. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 16, n. 1, p. 584–632, 2023. DOI: 10.26848/rbgf.v16.1.p584-632.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. *Geomorfologia*. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

COLLISCHONN, Walter. *Verificação e validação de modelos hidrológicos*. [S.l.].

COLLISCHONN, Walter et al. The exceptional hydrological disaster of April–May 2024 in southern Brazil. *RBRH*, v. 30, e1, 2025. DOI: 10.1590/2318-0331.302520240119.

COLLISCHONN, Walter et al. Unprecedented April–May 2024 rainfall in South Brazil sets new record. *RBRH*, v. 29, e50, 2024. DOI: 10.1590/2318-0331.292420240088.

CRISTIANO, Elena; TEN VELDHUIS, Marie-Claire; VAN DE GIESEN, Nick. Spatial and temporal variability of rainfall in urban areas – a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, p. 3859–3878, 2017. DOI: 10.5194/hess-21-3859-2017.

CUNHA, Alessandra Luiza Silva; PEREIRA, Carlos Eugênio. Modelagem hidrológica com SWAT+. *Revista Políticas Públicas & Cidades*, v. 14, n. 2, 2025. DOI: 10.23900/2359-1552v14n2-5-2025.

Da Silva, Lucas Guimarães, Rodrigo Cesar Da Silva, Willian José Ferreira, Jackes De Pablio Pereira Tiburcio, Thiago Moura Figueredo, e Marcelo Dos Santos Targa.

“VULNERABILIDADE A INUNDAÇÕES URBANAS: UMA ABORDAGEM GEOESTATÍSTICA PARA ANÁLISE DE RISCOS”. *ARACÊ* 7, n. 1 (2025): 758–75. <https://doi.org/10.56238/arev7n1-045>.

DE LIMA, J. L. M. P.; SINGH, V. P. The influence of the pattern of moving rainstorms on overland flow. *Advances in Water Resources*, v. 25, n. 7, p. 817–828, 2002. DOI: 10.1016/S0309-1708(02)00067-2.

Devido às fortes chuvas, Prefeitura da Vitória decreta estado de emergência. Disponível em: <<https://www.prefeituradavitoria.pe.gov.br/portal/index.php/2022/05/28/devido-as-fortes-chuvas-prefeitura-da-vitoria-decreta-estado-de-emergencia/>>. Acesso em: 8 jan. 2026.

DUARTE, C. C. et al. Análise fisiográfica da bacia hidrográfica do rio Tapacurá-PE. *Revista de Geografia*, v. 24, n. 2, 2007.

EMMANUEL, Isabelle et al. Influence of rainfall spatial variability on rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology*, v. 531, p. 337–348, 2015. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.058.

Fang, Zheng N., Michael J. Shultz, Kevin J. Wienhold, Jiaqi Zhang, e Shang Gao. “Case Study: Comparative Analysis of Hydrologic Simulations with Areal-Averaging of Moving Rainfall”. *Hydrology* 6, n. 1 (2019): 12. <https://doi.org/10.3390/hydrology6010012>.

FAN, Fernando; COLLISCHONN, Walter. Integração do modelo MGB-IPH com SIG. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 243–254, 2014.

FERREIRA, Willian José et al. Modelagem hidrológica em bacias urbanizadas pelo método CN. *ARACÊ*, v. 7, n. 1, p. 741–757, 2025. DOI: 10.56238/arev7n1-044.

FREITAS DIAS, Laerte et al. Entre secas e inundações. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 33, p. 579–603, 2023.

GAO, Shang; FANG, Zheng N. Investigating hydrologic responses to spatio-temporal characteristics of storms. *Hydrological Processes*, v. 33, n. 21, p. 2729–2744, 2019. DOI: 10.1002/hyp.13524.

GHIMIRE, Ganesh R. et al. Storm direction effect on flood response. *Journal of Hydrology*, v. 600, 2021. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126683.

GUAN, Xiaoxiang et al. Compound pluvial–fluvial flooding. *Water Security*, v. 19, 2023. DOI: 10.1016/j.wasec.2023.100136.

GUO, Zizheng et al. FSLAM: A QGIS plugin. *Environmental Modelling & Software*, v. 150, 2022. DOI: 10.1016/j.envsoft.2022.105354.

Hernandez, Christopher J., Greici Gunzel, Clarice Ritter, et al. “Leptospirosis? An Epidemiologic Investigation Following the Historic 2024 Floods in Rio Grande Do Sul, Brazil”. *One Health* 21 (dezembro de 2025): 101146. <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2025.101146>.

HELPER, Fernanda et al. Baseflow separation methods. *Journal of Hydrology*, v. 644, 2024. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132073.

KHOSH BIN GHOMASH, Shahin. *Significance of storm spatiotemporal variability and movement in flood hydrodynamic modelling*. BTU Cottbus–Senftenberg, 2024. DOI: 10.26127/BTUOPEN-6724.

LEE, Taesam et al. Basin rotation method for analyzing moving storms. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 29, p. 251–263, 2015. DOI: 10.1007/s00477-014-0870-y.

LIMA, Dário Macedo. *Abordagens distribuídas para simulação do escoamento superficial*. Dissertação (Mestrado) – UFPB, 2021.

LIMA, D.; PAZ, A.; XUAN, Y.; ALLASIA, D. Incorporating spatial variability in surface runoff modeling. *Computational Geosciences*, v. 28, p. 1331–1348, 2024.

LIMA, João Vitor Dias da Silva et al. Hidropixel-Plugin: desenvolvimento, ferramentas e aplicação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 26., 2025. *Anais*. Porto Alegre: ABRHidro, 2025.

José Mantovani, Alcântara Enner, Cheila Baião, et al. “Unprecedented Flooding in Porto Alegre Metropolitan Region (Southern Brazil) in May 2024: Causes, Risks, and Impacts”. Preprint, SSRN, 2024. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4867780>.

MARENGO, José A. et al. O maior desastre climático do Brasil. *Estudos Avançados*, v. 38, n. 112, p. 203–228, 2024. DOI: 10.1590/s0103-4014.202438112.012.

MARENGO, José A. et al. Flash floods and landslides in Recife. *Weather and Climate Extremes*, v. 39, 2023. DOI: 10.1016/j.wace.2022.100545.

Maior tragédia do século em Pernambuco, mortes pelas chuvas de 2022 superam total da cheia de 1975. Disponível em: <<https://www.folhape.com.br/noticias/maior-tragedia-do-seculo-em-pernambuco-mortes-pelas-chuvas-de-2022/228963/>>. Acesso em: 8 jan. 2026.

MAYOU, Lauren A. et al. Climate and land use impacts on urban runoff. *Journal of Environmental Management*, v. 362, 2024. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121284.

NICÓTINA, Luca et al. Impact of rainfall patterns on hydrologic response. *Water Resources Research*, v. 44, 2008. DOI: 10.1029/2007WR006654.

Niemczynowicz, Janusz. *Investigation of the Influence of Rainfall Movement on Runoff Hydrograph*. s.d. 1984

ORTH, Rene et al. Does model performance improve with complexity? *Journal of Hydrology*, v. 523, 2015. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.044.

PAZ, Adriano; COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos. Simulação hidrológica de rios com grandes planícies de inundação. *RBRH*, v. 15, n. 4, 2010. DOI: 10.21168/rbrh.v15n4.p31-43.

PEREIRA, Acauã Bernardo da Silva et al. Avaliação de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos distribuídos. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 17., 2022. *Anais*. Recife: ABRHidro, 2022.

PESSOA NETO, Amaury Gouveia. Caracterização morfométrica da bacia do rio Tapacurá. *Revista do Departamento de Geografia – USP*, v. 43, e200802, 2023. DOI: 10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2023.200802.

PERNAMBUCO. Prefeitura da Vitória de Santo Antão. Devido às fortes chuvas, Prefeitura da Vitória decreta estado de emergência. 28 maio 2022. Disponível em: <https://www.prefeituradavitoria.pe.gov.br/portal/index.php/2022/05/28/devido-as-fortes-chuvas-prefeitura-da-vitoria-decreta-estado-de-emergencia/>. Acesso em: 8 jan. 2026.

POMBOS (PE). Prefeitura Municipal. Decreto nº 24/2022: decreta situação de emergência nas áreas do município de Pombos afetadas por chuvas intensas. Disponível em: <https://www.pombos.pe.gov.br/publicacao.php?pg=decretono24-2022-decretasituacaodeemergencianasareasdomunicipiodepombosafetadasporchuvasintensascobrade>. Acesso em: 8 jan. 2026.

Prefeitura Municipal de Pombos/ PE. Disponível em: <https://www.pombos.pe.gov.br/publicacao.php?pg=decretono24-2022-decretasituacaodeemergencianasareasdomunicipiodepombosafetadasporchuvasintensascobrade>. Acesso em: 8 jan. 2026.

Qt GUI. Disponível em: <https://doc.qt.io/qt-6/qtgui-index.html>. Acesso em: 12 jan. 2026.

Singh, V. P. “Effect of Spatial and Temporal Variability in Rainfall and Watershed Characteristics on Stream Flow Hydrograph”. *Hydrological Processes* 11, n. 12 (1997): 1649–69. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19971015\)11:12%253C1649::AID-HYP495%253E3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19971015)11:12%253C1649::AID-HYP495%253E3.0.CO;2-1).

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS (SNIRH). Pedologia. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/ffeb6007-b741-4099-9889-5d50b3cd4168>. Acesso em: 8 jan. 2026.

SOUZA, Luiz Humberto de Freitas; RODRIGUES, Sílvia Carlos. Geomorfologia urbana e adaptação climática. *Physis Terrae*, v. 6, n. 2, p. 27–51, 2024. DOI: 10.21814/physisterrae.5795.

TUCCI, Carlos E. M. *Modelos hidrológicos*. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

Tucci, Carlos E. M. *1 INUNDAÇÕES URBANAS*. s.d. 2007

VEECK, S.; DA COSTA, F.F.; CORREIA LIMA, D. L.; DA PAZ, A. R.; ALLASIA PICCILLI, D.G.(2021). “*Scale dynamics of the HIDROPIXEL high-resolution DEM-based distributed hydrologic modeling approach*”. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 127. 104695, ISSN 1364-8152.

Vista do Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Tapacurá, Pernambuco, Brasil. Disponível em: <<https://revistas.usp.br/rdg/article/view/200802/199632>>. Acesso em: 8 jan. 2026.